

**Universidade de Brasília - UnB  
Faculdade UnB Gama - FGA  
Curso de Engenharia de Energia**

**MODELAGEM, FABRICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE UM MODELO  
REDUZIDO FUNCIONAL DE MICROTURBINA FRANCIS**

**Autores: Leonardo da Rocha Caixeta e  
Lucas Costa Amorim  
Orientador: Augusto César de Mendonça Brasil**

**Brasília, DF  
2014**



**Leonardo da Rocha Caixeta e Lucas Costa Amorim**

**MODELAGEM, FABRICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE MODELO REDUZIDO  
FUNCIONAL DE MICROTURBINA FRANCIS**

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia de Energia da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia.

Orientador: Doutor Augusto César de Mendonça Brasil.

Co-Orientador: Doutor Luciano Gonçalves Noleto.

**Brasília, DF**

**2014**

## **CIP – Catalogação Internacional da Publicação**

Amorim, Lucas. Caixeta, Leonardo.

Modelagem, fabricação e caracterização de um modelo reduzido funcional de microturbina Francis / Leonardo da Rocha Caixeta e Lucas Costa Amorim. Brasília: UnB, 2014.

Monografia (Graduação) – Universidade de Brasília Faculdade do Gama, Brasília, 2014. Orientação: Augusto César de Mendonça Brasil.

1. Microturbina Francis. 2. Fabricação de microturbina. 3. Caracterização de microturbina I. Brasil, Augusto. Doutor.

CDU Classificação



## **REGULAMENTO E NORMA PARA REDAÇÃO DE RELATÓRIOS DE PROJETOS DE GRADUAÇÃO FACULDADE DO GAMA - FGA**

**Leonardo da Rocha Caixeta e Lucas Costa Amorim**

Monografia submetida como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia da Faculdade UnB Gama - FGA, da Universidade de Brasília, em 25/06/14 apresentada e aprovada pela banca examinadora abaixo assinada:

---

**Prof. Doutor Augusto César de Mendonça Brasil, UnB/ FGA**

Orientador

---

**Prof. Doutor Luciano Gonçalves Noletto, UnB/ FGA**

Co-Orientador

---

**Prof. Doutor Alessandro Borges Souza Oliveira, UnB/ FGA**

**Membro Convidado**

Brasília, DF

2014

Dedicamos esse trabalho aos nossos pais e  
a todos aqueles que contribuem com novas  
ideias para o desenvolvimento tecnológico.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus por ter nós dado o dom da vida e por seu infinito amor por nós.

Aos nossos pais, por todo incentivo e orientação durante nossa vida. Nossos pais nunca mediram esforços para que nosso sonho de graduarmos em engenharia se transformasse em realidade. Sem a ajuda deles nada disso seria possível. Um agradecimento especial ao Manoel Lino de Amorim Filho por nos ajudar na construção do modelo final da microturbina Francis.

Agradecemos ao restante de nossos familiares pelo apoio, amor e carinho.

Também agradeço a todos os nossos professores da Universidade de Brasília que nós passaram o conhecimento necessário para esse trabalho da melhor forma possível. Agradecimento especial aos Doutores Augusto César de Mendonça Brasil e Luciano Gonçalves Noletto por toda ajuda e incentivo nos momentos mais difíceis desse projeto.

A todos nossos amigos por nos apoiarem mesmo quando não podíamos estar presente. Agradecimento especial as nossas colegas de curso Barbara Rios, Ina Tayane Barbosa, Luana de Sousa Moreira e Lorena Moreira por toda ajuda durante nosso projeto. Sabemos que sem a ajuda e incentivo delas nada disso seria possível.

## RESUMO

Visando minimizar os impactos causados pela falta de energia em regiões isoladas que apresentam dificuldades para serem atendidas pelo sistema interligado nacional o presente trabalho apresenta o planejamento necessário para a fabricação de uma microturbina Francis fabricada em plástico ABS, material que possui as melhores propriedades mecânicas dentre os filamentos plásticos utilizados para impressão 3D. No presente trabalho é apresentado a metodologia necessária para a fabricação do modelo da turbina Francis em uma impressora 3D do modelo RepRap, bem como a metodologia adotada para a simulação dos resultados esperados pela turbina no software *Ansys CFX*, responsável pela caracterização numérica do modelo físico em estudo. São apresentados os resultados do processo de fabricação da turbina, do modelo 3D simulado e dos resultados dos ensaios.

**Palavras-chave:** Microturbina Francis. Fabricação de microturbina. Caracterização de microturbina, Ansys CFX.

## **ABSTRACT**

To minimize the impacts caused by the lack of power in isolated regions that present difficulties to be met by the national grid, this article presents what is necessary for the fabrication of a Francis microturbine manufactured in ABS plastic, a material that has the best mechanical properties among planning plastic filament used for 3D printing. In this work is presented the methodology required to manufacture the model of Francis turbine in a RepRap 3D printer model and the methodology adopted for the simulation of expected the turbine in Ansys CFX software results, responsible for numerical characterization of the physical model study. The results of the manufacturing process of the turbine, the simulated 3D model and the test results are presented

**Keywords:** Francis Microturbine. Microturbine manufacturing process. Microturbine characterization, Ansys CFX.



## **LISTA DE ABREVIATURAS**

3D - Tri dimensional.

## **LISTA DE SIGLAS**

ABS - Acrilonitrila butadieno estireno.  
ANEEL- Agência nacional de energia elétrica.  
BEN - Balanço Energético Nacional.  
CERPCH - Central Nacional de Referencia em Pequenas Centrais Hidrelétricas.  
CGH - Centrais Geradoras Hidrelétricas.  
CV - Cavalo Vapor.  
EPE - Empresa de Pesquisa Energética.  
IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.  
IEA - Agencia Internacional de Energia.  
MME - Ministério de Minas e Energia.  
ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico.  
PCH - Pequenas Centrais Hidrelétricas.  
PDE - Plano Decenal de Energia.  
SIN - Sistema interligado Nacional.  
TCC - Trabalho de Conclusão de Curso.  
UHE - Usina Hidrelétrica de Energia.

## LISTA DE SIMBOLOS

$n_{qa}$	-	Velocidade específica.
D	-	Diâmetro.
$K_G$	-	Fator de escala geométrica.
$K_C$	-	Escala de velocidades.
$K_D$	-	Escala Dinâmica.
U	-	Velocidade tangencial.
$C_m$	-	Componente meridiana da velocidade absoluta da corrente fluida.
C	-	Velocidade absoluta da corrente fluida.
F	-	Força.
Fat	-	Forças de Atrito.
Fi	-	Forças Inerciais.
$\eta$	-	Eficiência.
$C_f$	-	Coeficiente de Força
$\rho$	-	Massa específica.
A	-	Área.
P	-	Pressão.
$\mu$	-	Viscosidade Dinâmica.
n	-	Número de rotações.
$C_D$	-	Coeficiente de arrasto.
$C_p$	-	Coeficiente de pressão.
$C_v$	-	Número de cavitação
E	-	Número de Euler.
Fr	-	Número de Froude.
Ma	-	Número de Mach.
Re	-	Número de Reynolds.
W	-	Número de Weber.

## Sumário

1.	OBJETIVOS.....	1
1.1.	OBJETIVO GERAL.....	1
1.2.	OBJETIVOS ESPECIFICOS .....	1
2.	INTRODUÇÃO .....	2
2.1.	ASPECTOS GERAIS .....	2
2.1.1.	Situação energética Brasileira .....	4
2.1.2.	Energia hidrelétrica e Turbinas Hidráulicas.....	10
2.1.3.	Elementos Construtivos.....	11
2.1.4.	Classificações de máquinas de fluxo .....	13
2.1.5.	Métodos de seleção de turbinas hidráulicas .....	14
2.1.6.	Turbina Francis .....	17
3.	METODOLOGIA .....	19
3.1.	DESENHO DO MODELO GEOMÉTRICO 3D.....	19
3.2.	PROCESSO DE OPERAÇÃO DA IMPRESSORA .....	20
3.3.	DINÂMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL .....	22
3.4.	ENSAIOS COM O MODELO REDUZIDO .....	26
3.5.	DESCRIÇÃO DOS EQUIPAMENTOS.....	29
3.6.	MONTAGEM DA TURBINA .....	30
3.7.	INCERTEZAS EXPERIMENTAIS .....	32
4.	RESULTADOS .....	33
4.1.	IMPRESSÃO 3D DO MODELO REDUZIDO .....	34
4.2.	SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DO PROTÓTIPO. ....	37
4.3.	ENSAIO DO MODELO REDUZIDO .....	43
5.	ORGANIZAÇÃO DO PROJETO.....	46
5.1.	CRONOGRAMA.....	46
6.	CONCLUSÃO .....	48
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	50

## 1. OBJETIVOS

### 1.1. OBJETIVO GERAL

O objetivo deste trabalho é o projeto envolvendo a modelagem, construção, simulação computacional e ensaio experimentais de uma microturbina Francis. Através de um modelo de turbina Francis pré-determinado e remodelado buscando a melhoria do mesmo.

Com a determinação do modelo a geometria selecionada deve ser importada para o software *CatiaV5R19* e posteriormente para o software de simulação, o software *ANSYS CFX* para que assim possa ser realizada a impressão 3D em material plástico.

### 1.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS

O presente trabalho tem como objetivo desenvolver um modelo físico de uma turbina Francis, bem como sua simulação para caracterização de seu comportamento hidrodinâmico.

É esperado do projeto:

- Avaliar a viabilidade de construção de um modelo geométrico de uma microturbina Francis através do programa *CatiaV5R19* para transposição da geometria para código de simulação de escoamento fluido;
- Simular as condições de operação de turbina virtual utilizando o programa *ANSYS CFX*;
- Imprimir o modelo geométrico em impressora 3D de um modelo reduzido de turbina Francis tendo como base a *PowerWheel* modelo funcional existente de uma micro turbina Pelton;
- Ensaio de funcionamento do modelo reduzido da turbina construída;
- Comparação dos resultados obtidos da simulação em relação aos dados obtidos experimentalmente a partir do modelo.

## 2. INTRODUÇÃO

### 2.1. ASPECTOS GERAIS

A eletricidade possui um papel de extrema importância na oferta de energia no Brasil correspondendo a 17,2% da oferta total de energia no país (PDE, 2009). As usinas hidrelétricas são as maiores responsáveis pela produção de energia no país. Em 2005 83,4% da energia elétrica produzida no Brasil veio de usinas hidrelétricas. Devido ao tamanho e características do Brasil é importante para a transmissão de energia elétrica um sistema de dimensões continentais, sendo o Sistema Interligado Nacional formado por empresas das regiões Sul, Sudeste, Centro-Oeste, Nordeste e parte da região Norte (ONS, 2013).

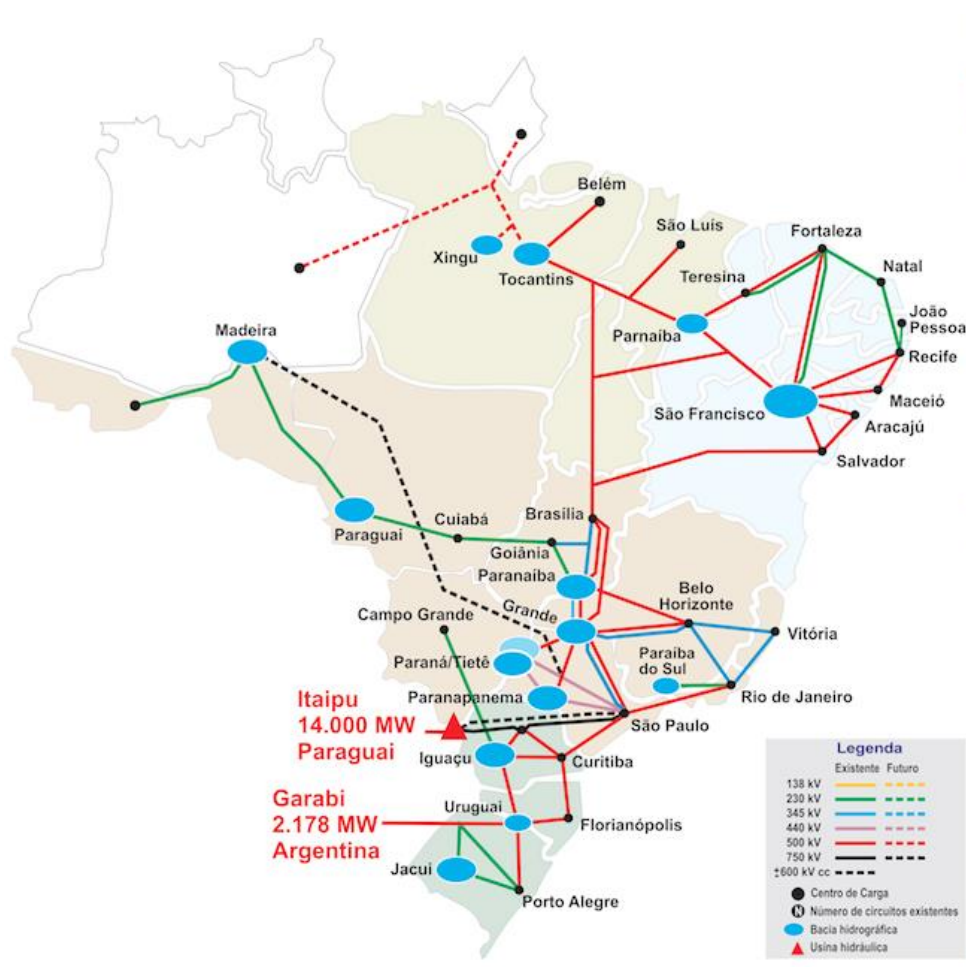


Figura 1 - Mapa do SIN. Fonte: ONS, 2013.

Apenas 1,7% da energia requerida pelo país não é atendida pelo Sistema Interligado Nacional (ONS, 2013). Sendo esses 1,7% concentrados na região amazônica, correspondendo a uma região rural de suma importância. O atendimento dessa região por via do SIN se torna muitas vezes inviável devido ao elevado custo da transmissão, e como se trata de uma região de baixa densidade demográfica o custo unitário da linha se torna muito grande.

Uma solução para atendimento dessa região é a produção de energia de forma descentralizada, sendo a utilização de microturbinas e PCH's como soluções adequadas para resolver o baixo aproveitamento hidrelétrico da região suprimindo assim parte da demanda energética.

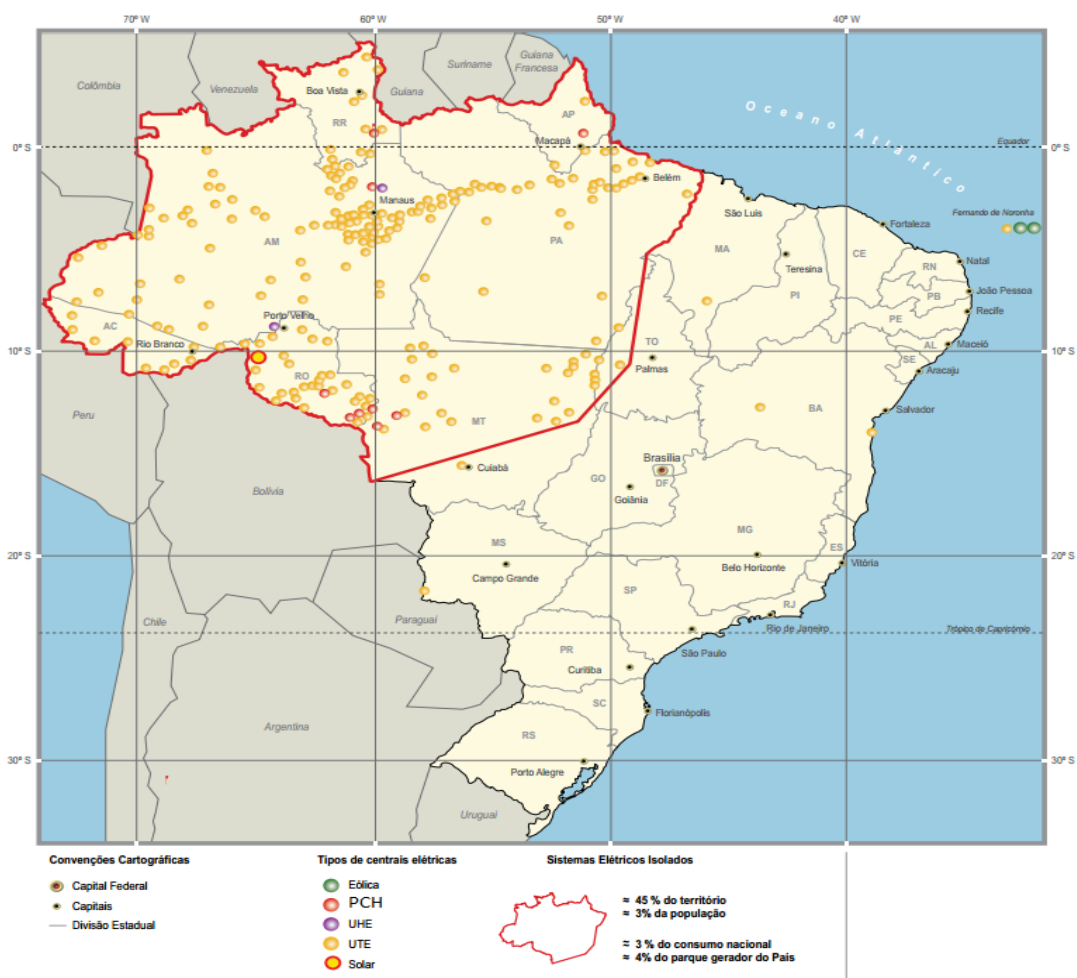


Figura 2 - Centrais elétricas que compõe os sistemas isolados, situação em outubro de 2012. Fonte: ANEEL Atlas de energia elétrica terceira edição.

### **2.1.1. Situação energética Brasileira**

A partir da Revolução Industrial, a energia passou a influenciar diretamente o nível de desenvolvimento de um país. Sendo assim a produção energética é essencial para o crescimento industrial de uma nação, portanto indispensável para o crescimento econômico do país. Algumas das principais variáveis para definir um país como desenvolvido são a facilidade de acesso da população aos serviços de infraestrutura, como saneamento básico, transportes, telecomunicações e energia. (ANEEL, 2012)

A facilidade de acesso da população aos serviços de infraestrutura, como saneamento básico está diretamente ligada à saúde pública. O acesso ao transporte e telecomunicações, à integração nacional. Já a energia é o fator determinante para o desenvolvimento econômico e social ao fornecer apoio mecânico, térmico e elétrico às ações humanas.

No mundo existe uma grande busca por novas fontes geração de energia. Muitas vezes ignorando ou menosprezando os impactos sociais e ambientais por esta gerada.

As principais fontes de geração de energia no mundo são o carvão e o petróleo. Sendo essas fontes não renováveis e altamente poluentes durante o processo de produção de energia.

A matriz energética mundial utiliza predominantemente combustíveis de fontes fósseis como pode ser visto na Figura (3). É necessário repensar a composição da matriz energética para que se possa conciliar desenvolvimento industrial e preservação do meio ambiente.

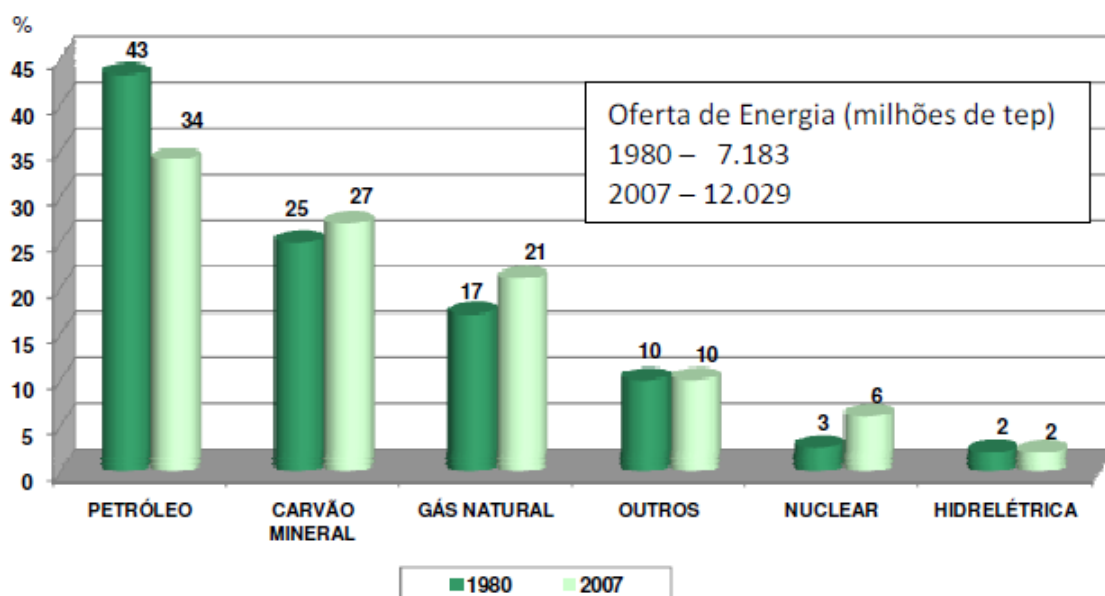


Figura 3 - Matriz de energia mundial, Fonte: Agencia internacional de energia.

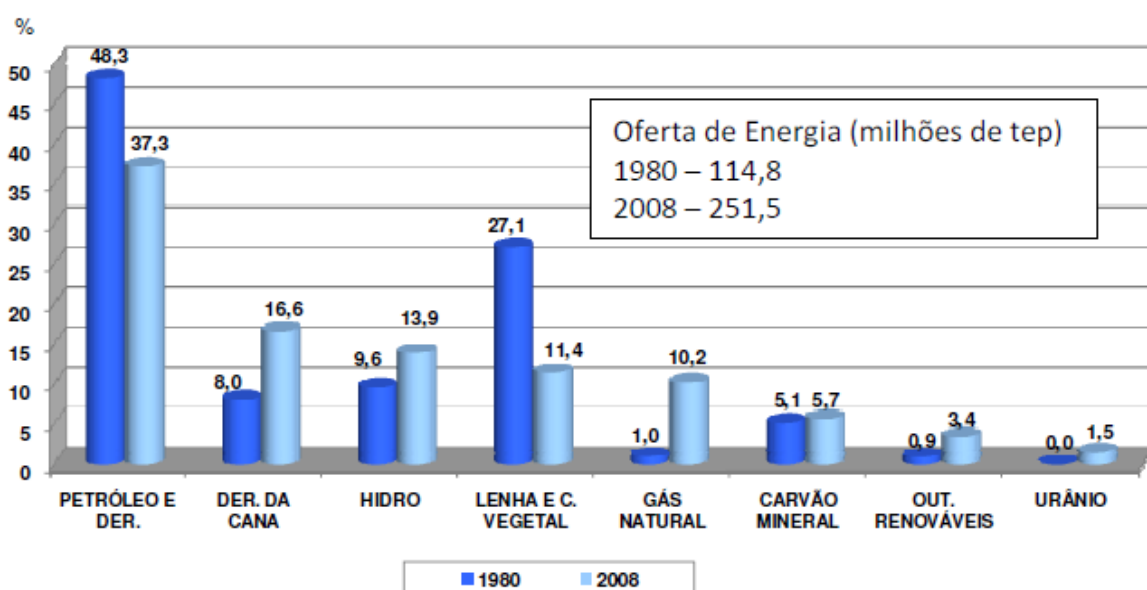


Figura 4 -Matriz de energia brasileira, Fonte: Balanço Energético Nacional.

A matriz brasileira pode ser considerada mais “limpa” quando comparada com a matriz energética mundial, sendo mais independente em relação à utilização de fontes fósseis de energia. Em sua matriz de energia elétrica o Brasil apresenta um grande percentual de produção de energia proveniente de fontes renováveis em relação à média mundial, como pode ser observado na comparação da Figura (7). Mesmo que essa forma de geração de energia também contribua para o efeito estufa, essa contribuição ainda é menor que de outras fontes não-renováveis mais utilizadas no mundo.



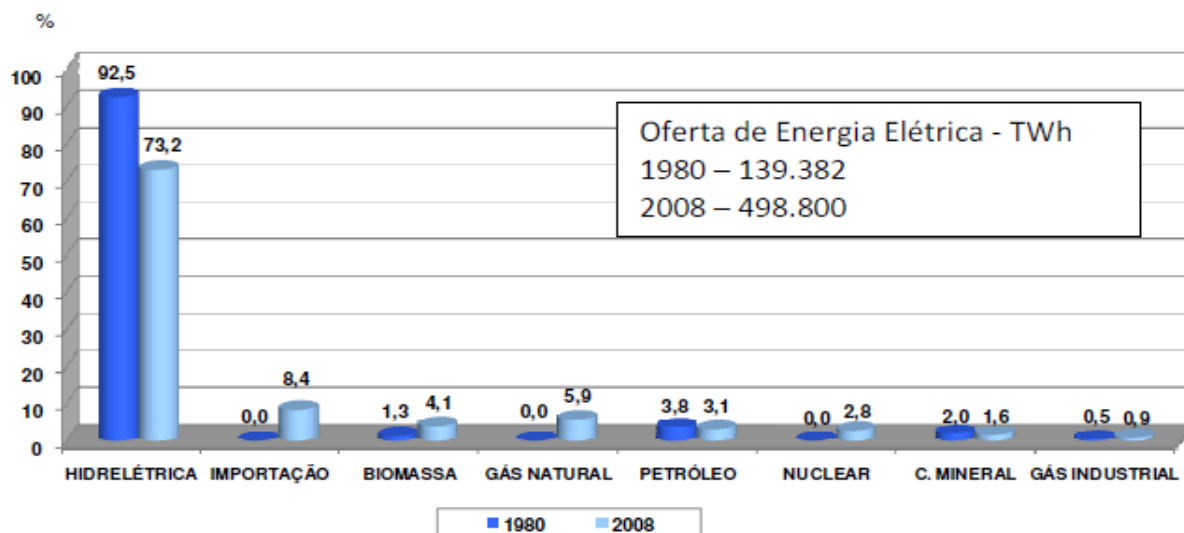


Figura 5 - Matriz de Energia elétrica Brasileira, Fonte: Balanço Energético Nacional.

Na Figura (5) é possível perceber um aumento da variedade de fontes de geração de energia elétrica no Brasil, o que resulta em uma diminuição percentual da utilização de energia elétrica provida de fontes hidrelétricas.

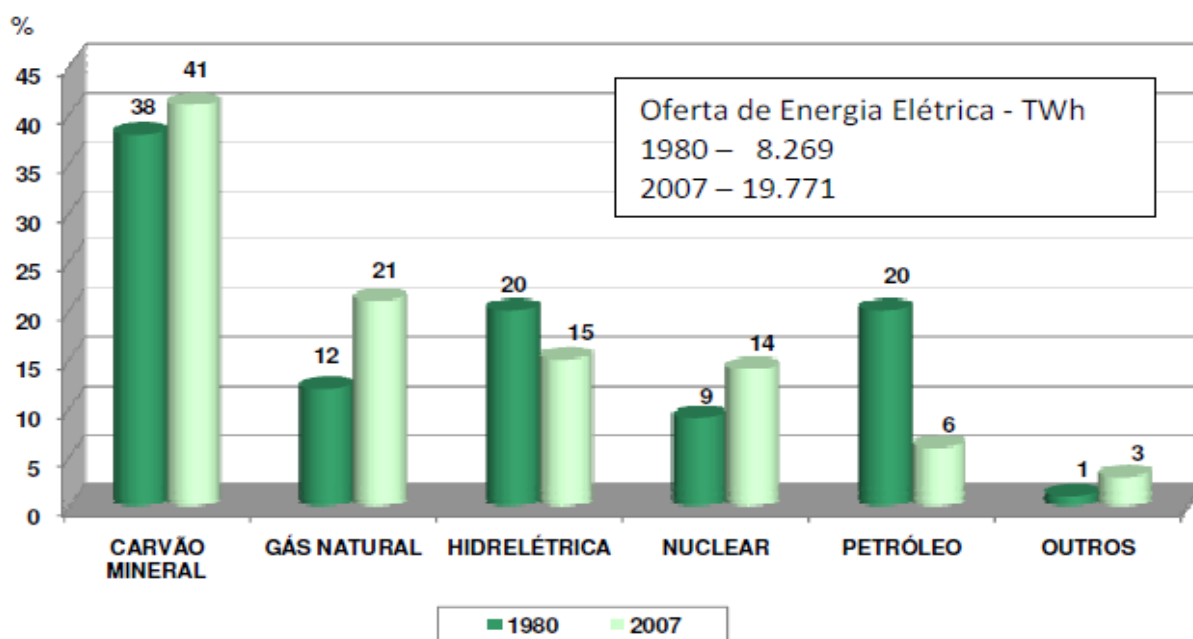


Figura 6 – Matriz de Energia Elétrica Mundial, Fonte: Agencia internacional de energia.

A partir da Figura (6) foi possível perceber um aumento da demanda energética mundial, resultando em uma redução considerável da dependência da utilização do petróleo como fonte de energia, em contra mão de um aumento considerável da utilização de fontes alternativas de energia como no caso da utilização do gás natural, que subiu de 12% para 21%.

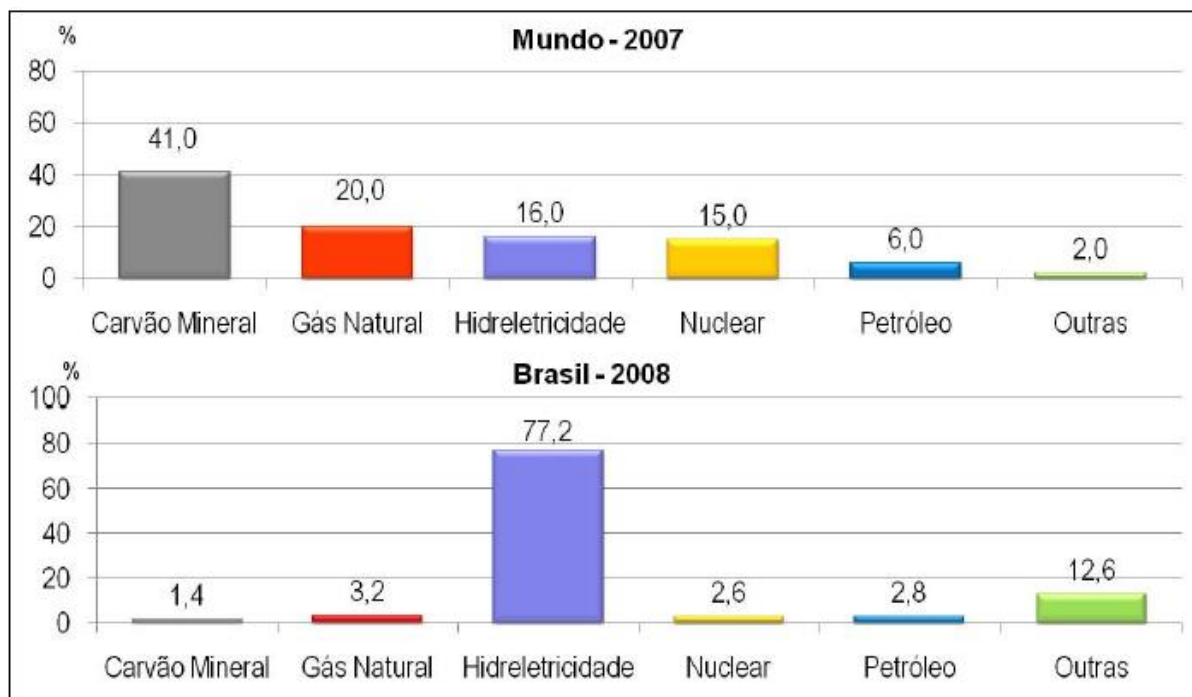


Figura 7 - Matriz de oferta de eletricidade MUNDO x BRASIL. Fonte BEN 2008.

Cerca de 95% da população brasileira, aproximadamente 184 milhões de habitantes segundo estimativas do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2010), tem acesso a energia elétrica. Devido às dimensões continentais do Brasil é necessário o uso do Sistema Interligado Nacional.

Essa grande interligação abrange maior parte do território nacional conectado do norte ao sul do país. Ainda assim existem diversos sistemas de menor porte, não conectados ao SIN que são chamados de sistemas isolados.

Segundo a ANEEL, a matriz energética atual do Brasil detalhadamente se apresenta de acordo com a Tabela (1).

Tabela 1 – Matriz de Produção de energia elétrica no Brasil 2012 Fonte: ANEEL 2012 .

Capacidade instalada				
Tipo		Número	Potência (kW)	%
Hídrica		838	78800731	68,28
Gás	Natural	93	10808812	9,37
	Processo	33	1252483	1,09
Petróleo	Óleo Diesel	805	3871104	3,35
	Óleo Residual	25	2030403	1,76
biomassa	Bagaço de Cana	289	4642515	4,02
	Licor Negro	14	1193298	1,03
	Madeira	37	315767	0,27
	Biogás	9	44672	0,04
	Casca de Arroz	7	31408	0,03
Nuclear		2	200700	1,74
Carvão Mineral		9	1530304	1,33
Eólica		38	709284	0,62
Importação	Paraguai		5650304	5,46
	Argentina		2250000	2,17
	Venezuela		200000	0,19
	Uruguai		70000	0,07
Total		2199	115407781	100

Analisando a Tabela (1) podemos observar que grande parte da produção de energia elétrica é proveniente de fontes hidroelétricas, sendo esta participação de 68,28% da capacidade instalada de geração de energia.

A localização das usinas hidrelétricas é uma grande dificuldade para o sistema elétrico nacional. Normalmente elas são construídas afastadas do local de consumo. Essa distância gera um desperdício de energia durante o processo de transmissão. Além do problema de que os reservatórios das usinas de forma geral não se mantêm regulares durante o ano inteiro, devido ao regime hidrológico. O que faz com que seja necessário transporte de grande armazenamento hidráulico de uma região à outra do país, tentando assim suprir as diferenças dos reservatórios entre as regiões.

Uma alternativa para minimizar essa grande perda de energia é a geração distribuída; que ao invés de se utilizar grandes centrais hidrelétricas são empregadas pequenas centrais hidrelétricas. Sendo que pela maior facilidade de implantação essas pequenas usinas ficam próximas do consumidor final, diminuindo assim as perdas de energia durante a etapa de transmissão.

As principais tecnologias de geração distribuída de energia são as células combustíveis, as microturbinas a gás, os motores de combustão interna de baixa emissão, os motores *Stirling* e os painéis fotovoltaicos. Pode-se citar também as pequenas centrais hidrelétricas, as termelétricas solares, as usinas eólicas e a cogeração, sob certas condições, também se enquadram nesse conceito de geração distribuída. A geração distribuída ajuda abastecer regiões atualmente não atendidas pelo SIN ou mesmo aumentar a geração de energia no próprio SIN.

No Brasil existem cerca de dois milhões de domicílios rurais não atendidos pelo SIN, sendo a maior parte deles nas Regiões Norte e Nordeste, correspondendo a 80% do total nacional da exclusão elétrica, ou seja, 10 milhões de brasileiros vivem no meio rural sem acesso ao público de energia (MME, 2008). Além do déficit de energia elétrica ser normalmente associado a áreas rurais, ele também é desproporcional entre as regiões do país. Dos 5.507 municípios brasileiros, apenas 214 têm todos os domicílios com energia elétrica (Goldemberg, LA Rovere, Coelho, 2004).

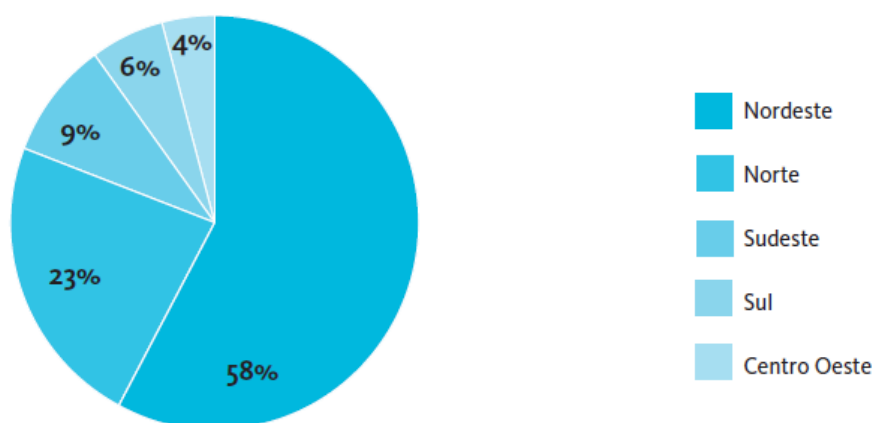


Figura 8 – Localização Regional dos Domicílios Rurais sem Atendimento de Energia Elétrica (%).  
Fonte: MME 2004.

### **2.1.2. Energia hidrelétrica e Turbinas Hidráulicas**

As primeiras utilizações práticas de máquinas de fluxo hidráulicas foram à criação de rodas d'água e os moinhos de vento, que tiveram grande importância e um uso bastante difuso pela Europa durante séculos devido a sua grande simplicidade e facilidade de construção. Um exemplo foi Vitruvius que projetou e instalou uma série de rodas d'água para utilização de dispositivos mecânicos, como moedores de grão. (Macintyre, 1983)

Daniel Bernoulli durante o século XVIII lançou os fundamentos da hidrodinâmica e Leonard Euler inventou a roda de reação com distribuidor fixo, que é considerada uma das principais precursoras da turbina atual. Porém somente no século XIX, o termo turbina apareceu pela primeira vez durante os estudos do francês Claude Burdin. (Macintyre, 1983)

A primeira construção de uma turbina industrial documentada ocorreu em 1827 por Benoit Fourneyron, que desenvolveu uma turbina centrífuga de 6 CV com um rendimento de cerca 80%.

Durante o projeto de uma central hidrelétrica é fundamental considerar os aspectos socioambientais, mesmo se tratando de uma fonte de energia renovável.

Um exemplo é a usina de ITAIPU que durante sua construção foi desmatada uma grande área de vegetação. Com o desmatamento alterou-se o ecossistema e causou impactos devido ao reservatório que para ser formado foi necessário inundar grandes áreas de mata nativa. A maior parte dos potenciais hidráulicos está na região amazônica, em zonas de proteção ambiental.

As turbinas hidráulicas apresentam uma grande variedade de formas e tamanhos. O modelo mais utilizado é o Francis, uma vez que se adapta tanto a regiões com baixa queda quanto a regiões de alta queda. Como trabalha totalmente submersa, seu eixo pode ser horizontal ou vertical (RAMAGE, 1996).

A Agência Nacional de Energia Elétrica classifica de três diferentes maneiras as centrais hidrelétricas, como pode ser visto na Tabela (2).

Tabela 2 – Classificações das centrais hidrelétricas. Fonte: ANEEL 2012.

Nome	Sigla	Potência Instalada
Centrais Geradoras Hidrelétricas	CGH	Até 1 MW
Pequenas Centrais Hidrelétricas	PCH	Entre 1,1 MW e 30 MW
Usina Hidrelétrica de Energia	UHE	Maior que 30 MW

### 2.1.3. Elementos Construtivos

Podemos definir uma máquina de fluxo como uma máquina capaz de transformar energia, sendo a principal energia o trabalho mecânico, que no caso de turbinas é transformado em energia elétrica. A passagem do fluido pela máquina interage com um elemento rotativo que não está confinado em momento algum. (HENN, 2012)

As turbinas são geralmente constituídas basicamente de um motor e um gerador; o motor recebe energia disponível e a transforma em trabalho mecânico, que por sua vez é aproveitado pelo gerador para a obtenção de energia elétrica desejada (BRAN e SOUZA, 1980).

Os principais elementos construtivos de qualquer turbina, fundamentais para sua fabricação são o rotor, as pás giratórias, o sistema diretor e o gerador.

No rotor é onde acontece a transformação da energia do fluido em energia mecânica através da rotação das pás giratórias. Segundo Henn (2012), o rotor é o principal órgão de uma máquina de fluxo.

As pás giratórias são posicionadas na turbina Francis de modo que entre elas sejam formados canais, por onde irá circular o fluido de trabalho.

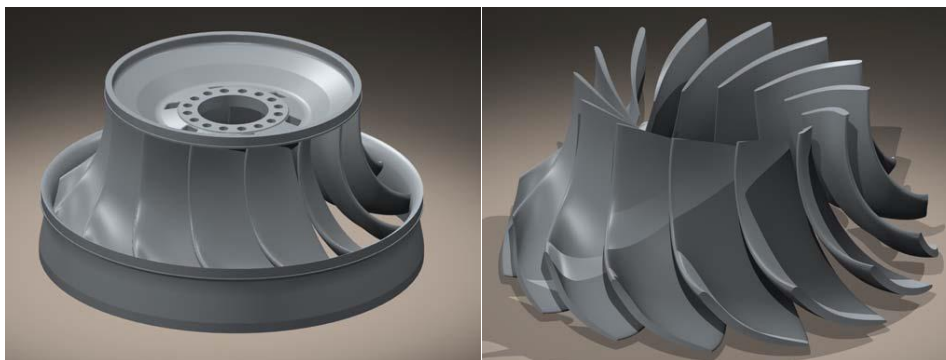


Figura 9 – Modelo 3D de um rotor e suas pás giratórias isoladas. Fonte: Nava, Gómez, Hernández 2006.

O sistema diretor é formado por uma coroa circular com aletas móveis, e tem como objetivo guiar o fluido por um caminho pré-determinado através da inclinação de suas aletas (Henn, 2012).



Figura 10 – Exemplo de sistema diretor, Fonte: TECNOMETAL 2013.

O gerador é o sistema responsável por converter a potência de eixo gerada a partir da rotação das pás em energia elétrica. Sendo este o maior objetivo de uma turbina hidráulica. Os geradores de centrais hidrelétricas podem ser síncronos ou assíncronos.

Geradores síncronos são os mais utilizados em geradores de centrais hidrelétricas, devido a sua versatilidade operativa e elevados rendimentos na conversão de energia, cujos valores podem chegar a 97%.

Geradores assíncronos possuem a característica de trabalharem com rotações levemente diferentes das rotações síncronas. É o tipo de gerador mais robusto em relação à manutenção.

Quando operamos geradores assíncronos em paralelo ao o sistema elétrico se trata de uma opção mais simples e economicamente mais atrativa que os geradores síncronos, para potências menores, da ordem de poucos MVA (CERPCH, 2013).



Figura 11 – Exemplos de geradores - gerador síncrono à esquerda e assíncrono à direita. Fonte: Bambozzi 2013.

#### 2.1.4. Classificações de máquinas de fluxo

As máquinas de fluxo podem ser classificadas basicamente conforme: a direção da conversão de energia, a forma dos canais entre as pás do rotor, e a trajetória do fluido no rotor.

Tabela 3 – Classificação de máquinas de fluxo pela direção da conversão de energia. . Fonte: MME 2008.

Classificação	Descrição
<b>Máquinas motoras</b>	Transformam a energia de fluido em trabalho mecânico.
<b>Máquinas geradoras</b>	Recebem o trabalho mecânico e o transforma em energia de fluido.

Tabela 4 - Classificação de máquinas de fluxo pela forma dos canais entre as pás do rotor. Fonte: MME 2008.

Classificação	Descrição
<b>Máquinas de ação</b>	A função dos canais é simplesmente servir de guia ou desviadores de fluxo do fluido, não havendo variação da pressão do fluido que passa pelo rotor.
<b>Máquinas de reação</b>	A função dos canais é de variar a pressão do fluido, nas bombas há um aumento da pressão e no caso das turbinas há uma redução de pressão que passa pelo rotor.



Tabela 5 - Classificação de máquinas de fluxo quanto à trajetória da água no rotor. Fonte: MME 2008.

<b>Classificação</b>	<b>Trajétória da água</b>	<b>Turbinas</b>
<b>Máquinas de fluxo radial</b>	O fluído percorre uma trajetória predominantemente radial ao eixo do rotor.	Francis
<b>Máquinas de fluxo axial</b>	O fluído percorre o caminho paralelo ao eixo do rotor.	Hélice, Kaplan
<b>Máquinas de fluxo tangencial</b>	O fluído escoia de forma tangencial ao rotor.	Pelton

Existem outras variações de classificação de máquinas de fluxo como a tubular, a straflo, a Propeller, a de fluxo livre, denominada de hidrocínética, além de outras.

#### **2.1.5. Métodos de seleção de turbinas hidráulicas**

Existem vários métodos de seleção de turbinas hidráulicas. Sendo que algumas vezes é necessário observar mais de um método para a seleção da melhor turbina para cada caso.

Ao observarmos a figura (12) vemos que existem regiões onde um ou mais tipos de turbinas são adequados. Nessas situações deve-se levar em consideração outros métodos de seleção tal como o custo do gerador elétrico, risco de cavitação, flexibilidade de operação, construção civil, facilidade de manutenção, entre outros critérios para selecionar a melhor máquina para cada aplicação (HENN,2012).

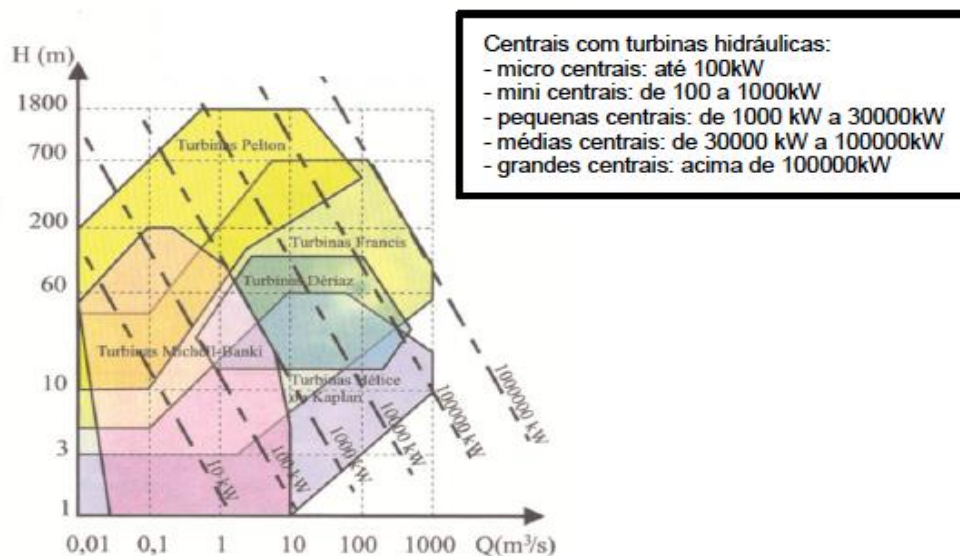


Figura 12 - Campo de Aplicação de Turbinas Hidráulicas. Fonte: Henn, 2012 p. 32.

A partir da análise da figura (13) outro método de seleção considerando a velocidade de rotação específica e a altura da queda é apresentado.

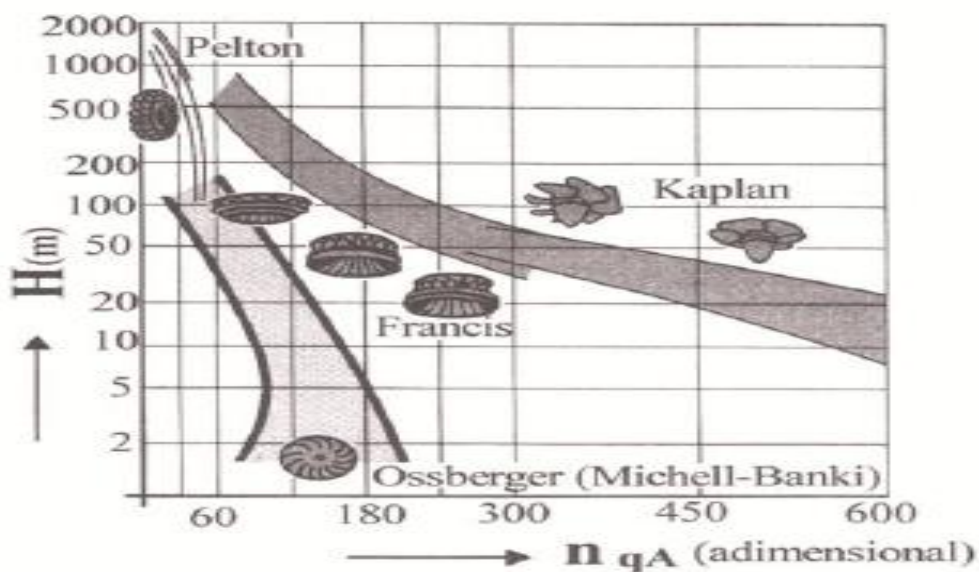


Figura 13 - Seleção de Turbinas Hidráulicas Fonte: Henn, 2012 p. 119.

Analisando a tabela (6) é possível selecionar a máquina de fluido levando em consideração a velocidade de rotação específica que está associada à forma e às proporções dos rotores de máquinas de fluxo.

Tabela 6 - Valores de  $n_{qa}$  indicados para diferentes tipos de máquinas de Fluido. Fonte: Henn, 2012 p.118.

Turbina	Velocidade específica ( $n_{qa}$ )
Turbina hidráulica Pelton	$n_{qa} = 5$ a $70$
Turbina hidráulica Francis Lenta	$n_{qa} = 50$ a $120$
Turbina hidráulica Francis Normal	$n_{qa} = 120$ a $200$
Turbina hidráulica Francis Rápida	$n_{qa} = 200$ a $320$
Turbina hidráulica Michell-Banki	$n_{qa} = 30$ a $210$
Turbina Dériaz	$n_{qa} = 200$ a $450$
Turbina Kaplan e Hélice	$n_{qa} = 300$ a $1000$
Turbina a vapor e a gás com admissão parcial	$n_{qa} = 6$ a $30$
Turbina a vapor e a gás com admissão total	$n_{qa} = 30$ a $300$
Bomba de deslocamento positivo	$n_{qa} < 30$
Bomba centrífuga	$n_{qa} = 30$ a $250$
Bomba semi-axial ou de fluxo misto	$n_{qa} = 250$ a $450$
Bomba axial	$n_{qa} = 450$ a $1000$
Compressor de deslocamento positivo	$n_{qa} < 20$
Ventilador e turbocompressor centrífugo	$n_{qa} = 20$ a $330$
Ventilador e turbocompressor axial	$n_{qa} = 330$ a $1800$

Considerando um contexto geral, quando ocorre uma grande queda e pequenas vazões as turbinas mais indicadas são do tipo Pelton. Já para pequenas quedas e grandes vazões o mais indicado são as turbinas Kaplan ou hélice.

O modelo mais indicado para este projeto é o de turbina Francis, ela possui uma maior faixa de operação em relação às outras turbinas. Como visto na figura (12). A turbina poderá ser utilizada em varias comunidades com diferentes situações geográficas.

#### **2.1.6. Turbina Francis**

A turbina Francis foi desenvolvida por James Bicheno Francis (1815-1892), engenheiro hidráulico inglês posteriormente naturalizado como americano, foi documentado como o primeiro pesquisador americano digno de notoriedade no campo da hidráulica.

Durante os estudos de uma turbina para aproveitamento energético do desnível de um determinado rio atentou-se a uma máquina de escoamento centrípeta, patenteada por Samuel Dowd. O resultado foi um aperfeiçoamento tão significativo em relação ao equipamento de Dowd que a nova máquina, passou a ser chamada de Turbina Francis.

A turbina do tipo Francis tem o seu funcionamento rigorosamente centrípeto e utiliza tubo de sucção, originalmente proposto por Jonval em 1843, que tem o intuito de guiar a água da saída do rotor até o poço de descarga, o que resulta em um aumento significativo na energia cinética na saída do rotor (Soares, 2013). Além de melhorar o rendimento da turbina recuperando a pressão.



Figura 14 – Exemplo de turbina Francis. Fonte: CERPCH 2013.

As turbinas Francis podem ser classificadas em função da relação entre o diâmetro de entrada e o de saída (Henn, 2012). Diz-se que o rotor é do tipo:

- Francis lenta quando o diâmetro de entrada é maior que o de saída ( $55 < n_s < 120$  rpm);
- Francis normal quando o diâmetro de entrada é igual ao de saída ( $120 < n_s < 200$ );
- Francis rápida quando diâmetro de entrada é menor que o de saída ( $200 < n_s < 450$ ).

Para turbinas Francis o tipo do rotor varia de acordo com a relação existente entre a queda e a vazão de forma proporcional, ou seja, quanto maior for a queda d'água e menor a vazão mais lento será o rotor.

Tabela 7 - Relação de usinas consideradas (turbina do tipo Francis). Fonte: EPE 2013.

UHE	
São Roque	Salto Pilão
Itaguaçu	Simplício Queda única
Salto do Rio Verdinho	Mauá
Salto	Água Limpa
Ribeiro Gonçalves	Foz do Chapecó
Dardanelos	Campos Novos
Garibaldi	Teles Pires
Telêmaco Borba	Belo Monte

### 3. METODOLOGIA

#### 3.1. DESENHO DO MODELO GEOMÉTRICO 3D

A microturbina Francis desenvolvida no presente projeto foi inspirada na microturbina Pelton fabricada pela empresa PowerWheel, que se trata de um equipamento didático de ensaios de turbinas.

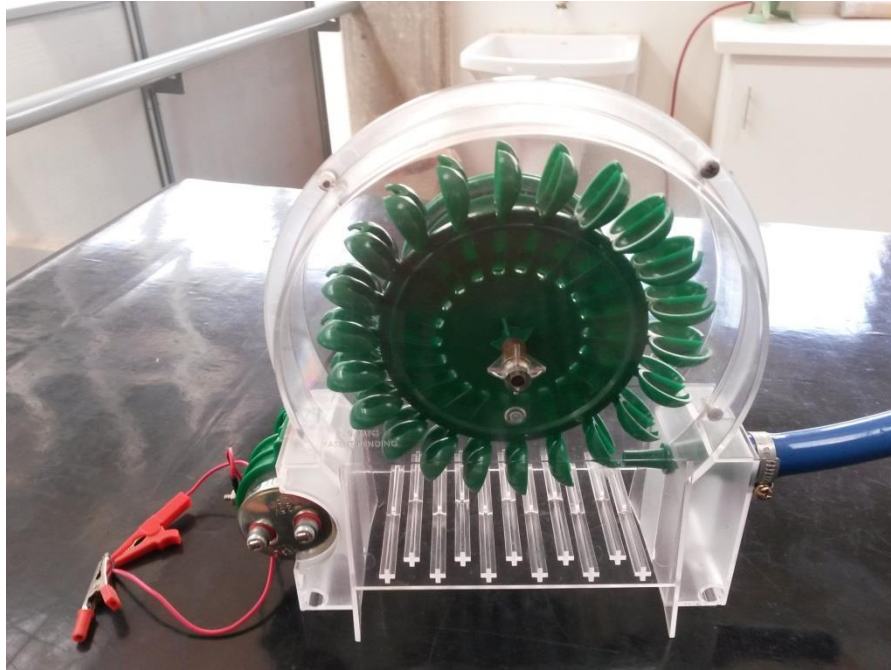


Figura 15 – modelo para estudos desenvolvido pela empresa PowerWheel.

Para a elaboração do modelo 3D da Turbina Francis foram respeitados as dimensões de modelos pré-existent de turbinas. A escala utilizada foi baseada na capacidade produtiva da impressora 3D de 8x8x8cm. Sendo o volume do sólido fabricado de 71,1cm<sup>3</sup>. Todas as operações relativas às adaptações das dimensões e escalas da turbina para enquadrá-la no limite de operação da impressora 3D foram feitas através do o software *CatiaV5R19*.

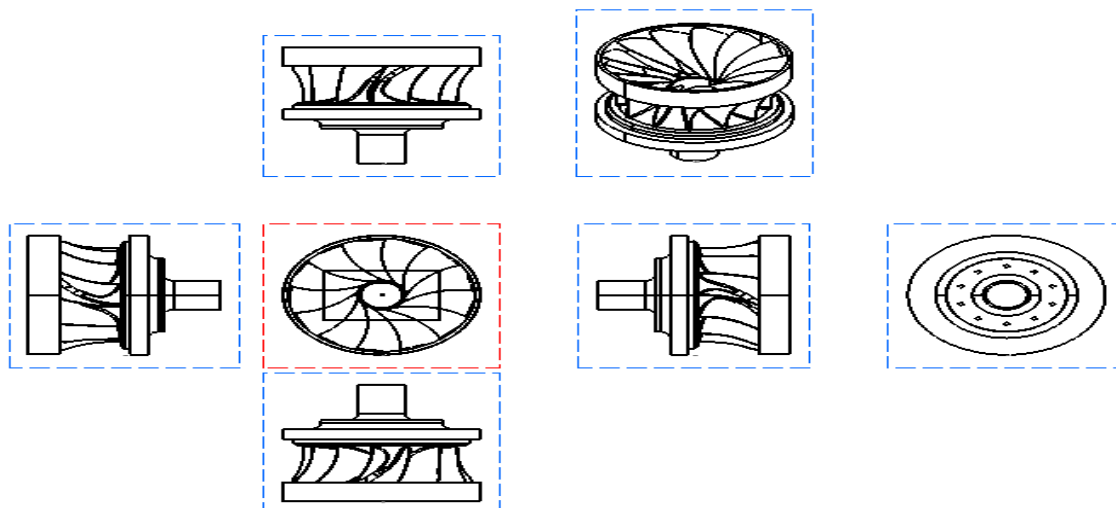


Figura 16 - Vistas do desenho 3D final.

### 3.2.PROCESSO DE OPERAÇÃO DA IMPRESSORA

Estereolitografia ou impressão 3D é um processo utilizado para manufatura rápida de peças e modelos físicos de sólidos. Os dados sólidos 3D são traduzidos para uma representação de malha facetada composta por um conjunto de triângulos e salvos em um arquivo STL (Autodesk, Inc. 2011).

Neste projeto os dados do desenho geométrico do rotor e do sistema diretor foram salvos no formato STL, sendo este formato fundamental para a fabricação de qualquer produto utilizando a impressora 3D.

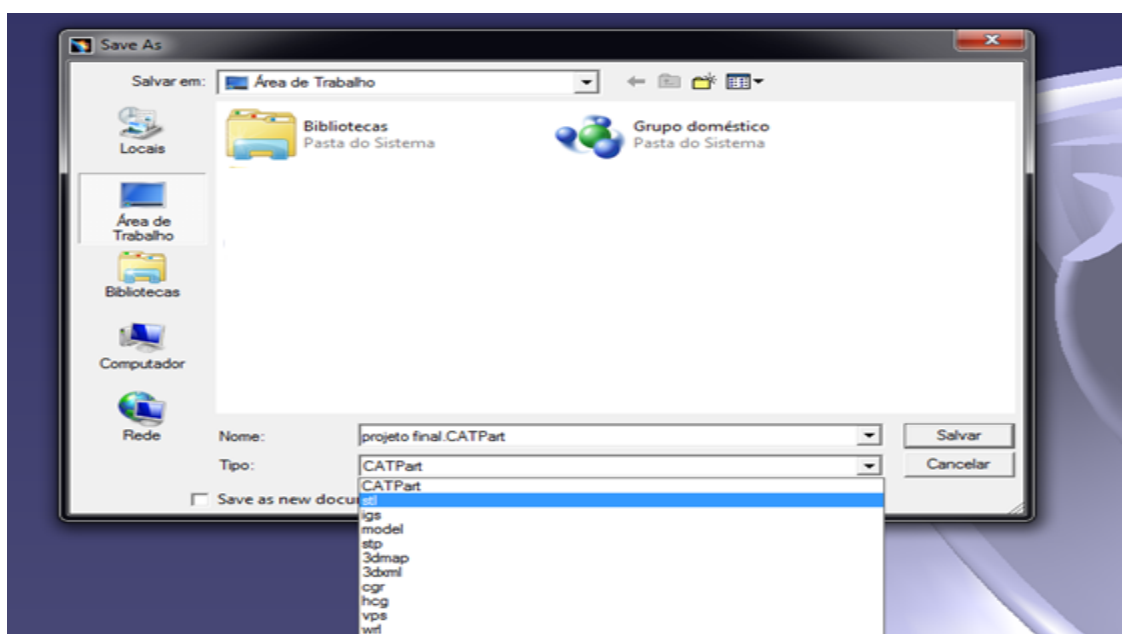


Figura 17 – Exemplo de exportação para o formato STL.



Para iniciar o processo de impressão foi necessário à utilização do software Pronterface, que é um dos principais softwares de controle da impressora 3D, onde são definidos alguns parâmetros para a impressão da peça como a temperatura de operação da impressora.

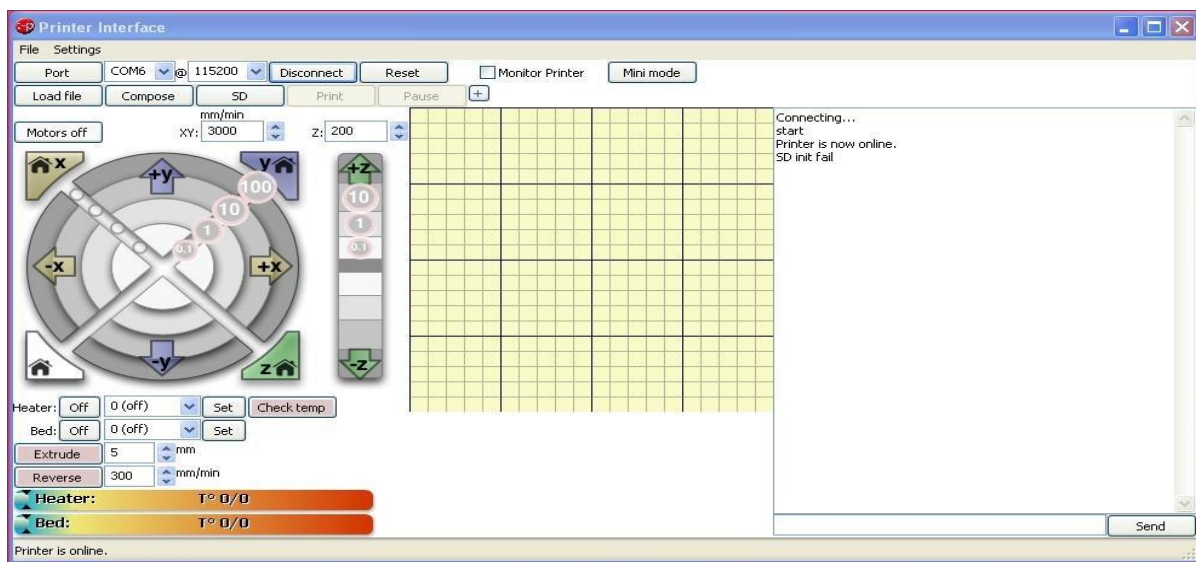


Figura 18 - Tela de operação do software *Pronterface*. Fonte: *Tyne Gadgets* 2013.

A partir do momento em que é definida a temperatura de operação da máquina, é necessário utilizar o software *Slic3r*, que é o software responsável por definir como será realizada a impressão. No *Slic3r* são definidos parâmetros como a velocidade com que a peça será impressa, a densidade do fio e da peça, se há ou não a necessidade de um suporte, o ângulo de impressão da peça, a escala, a temperatura de início da impressão.

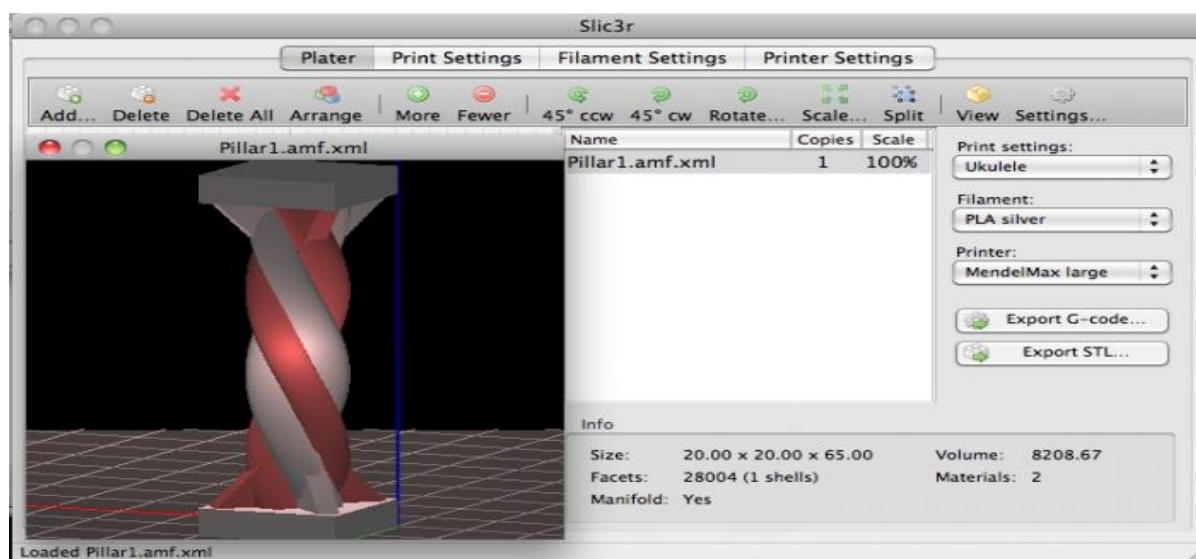


Figura 19 - Tela de operação do software *Slic3r*. Fonte: *Slic3r Manual* 2013.



A partir do momento em que foram definidos todos os parâmetros necessários para a impressão da peça é necessário exportar tais informações para o *Pronterface*, tais informações são salvas no formato *G-Code*.

Com todas as etapas concluídas é possível então iniciar a fabricação da turbina no software *Pronterface*. Simplificando o processo em etapas:

1. Importar o arquivo STL do sólido desenhado no *CatiaV5R19*.
2. No *Pronterface* iniciar a máquina extrusora e a mesa de impressão o processo de aquecimento do equipamento para a impressão.
3. Obter o arquivo *G-Code* no software *Slic3r*, contendo todas as definições dos parâmetros de impressão.
4. Importar o arquivo *G-Code* para o *Pronterface* e iniciar a fabricação do sólido.

### 3.3.DINÂMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL

O software utilizado para a simulação computacional será o *ANSYS CFX*, que se trata de um subprograma de uma grande plataforma integrada, a *Ansys workbench*. Sendo o *ANSYS CFX* o *software* selecionado pela facilidade de trabalhar com turbo máquinas, possuindo ferramentas específicas para este sistema. O *ANSYS CFX* é uma ferramenta robusta e confiável, possui um avançado sistema de soluções para modelagem numérica, se tratando de um sistema intuitivo e interativo de descrição de problemas, com avançadas opções gráficas; além de uma total integração com a definição do problema, possibilitando a análise total e apresentação dos resultados.

A *Ansys workbench* é uma coletânea de subprogramas que são aplicados em basicamente todas as áreas da engenharia, utilizando métodos numéricos computacionais para modelagem numérica em soluções para engenharia.

O principal método utilizado pelo *ANSYS CFX* para a solução e modelagem de sistemas é o método de volumes finitos Baseado em elementos. A partir de um modelo real foi determinado um modelo CAD contínuo, que então foi discretizado pelo software *ANSYS CFX*.

O *ANSYS CFX* se trata de uma ferramenta inteiramente dependente de modelos geométricos, das condições físicas do modelo estudado e das condições de contorno especificadas.

Para a simulação do protótipo da turbina Francis projetada no software *ANSYS CFX* primeiramente é necessário importar o arquivo CAD desenvolvido no software *CATIA V5R19* salvo no formato IGS (formato necessário para simulações no CFX) utilizando a ferramenta *Geometry*.

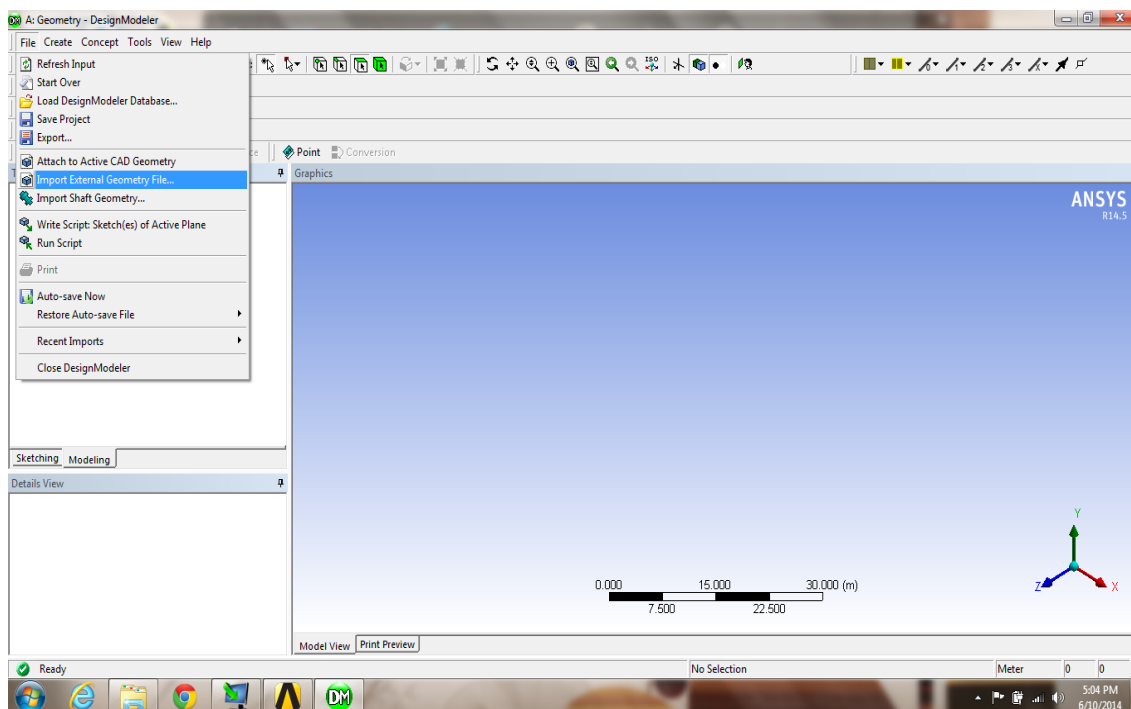


Figura 20 - Importando o arquivo IGS.

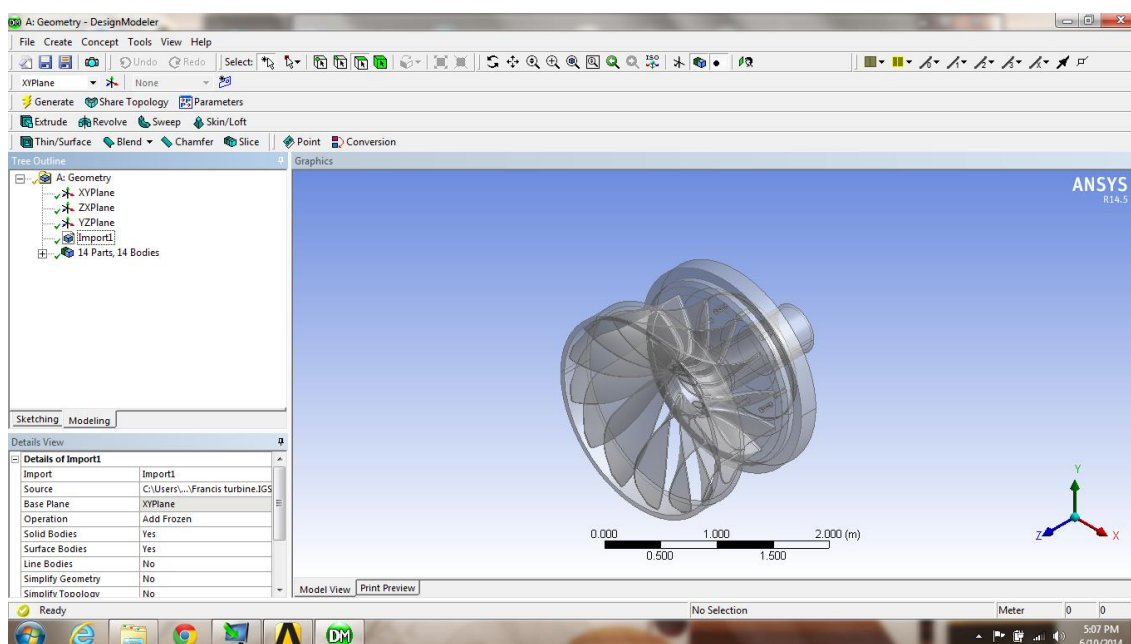


Figura 21 - Arquivo importado para o ANSYS CFX.

Com a geometria definida é necessário criar um volume de controle, onde ocorrerão às iterações numéricas, nesse volume de controle são definidas as entradas e as saídas do escoamento desejado. A criação do volume de controle requer do usuário uma experiência previa em desenho 3D, sólidos de revolução e noção espacial.

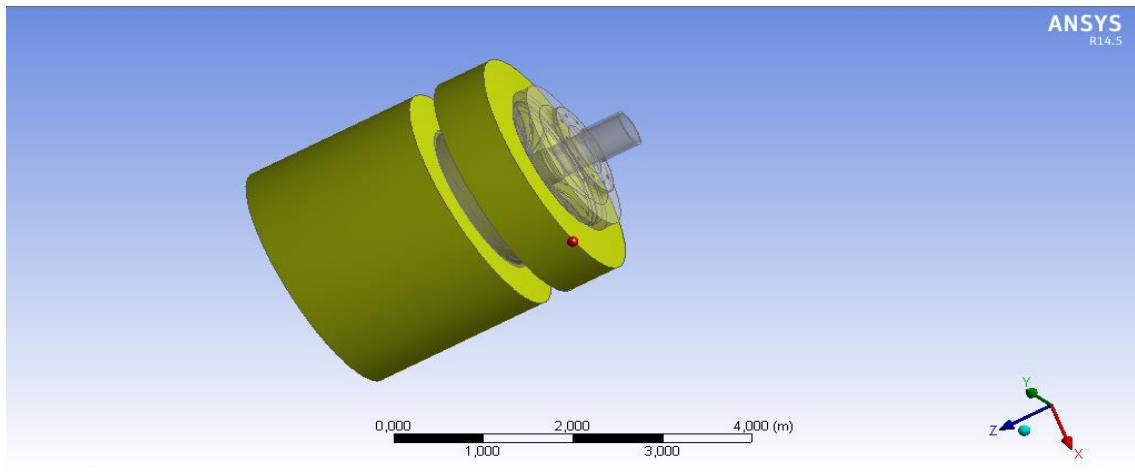


Figura 22 – Definição do volume de controle.

A determinação da malha, onde ocorrerá o processo de simulação, é uma das principais etapas para obter resultados coerentes, primeiramente é gerada uma malha automática para que assim possa ser feito um refinamento nos pontos insatisfatórios, tais pontos normalmente são verificados após informações de erro enviadas pelo sistema do software. Com isso podem ser determinados os pontos de entrada (*Inlet*) e saída (*Outlet*) do escoamento bem como as paredes do sistema (*Wall*).

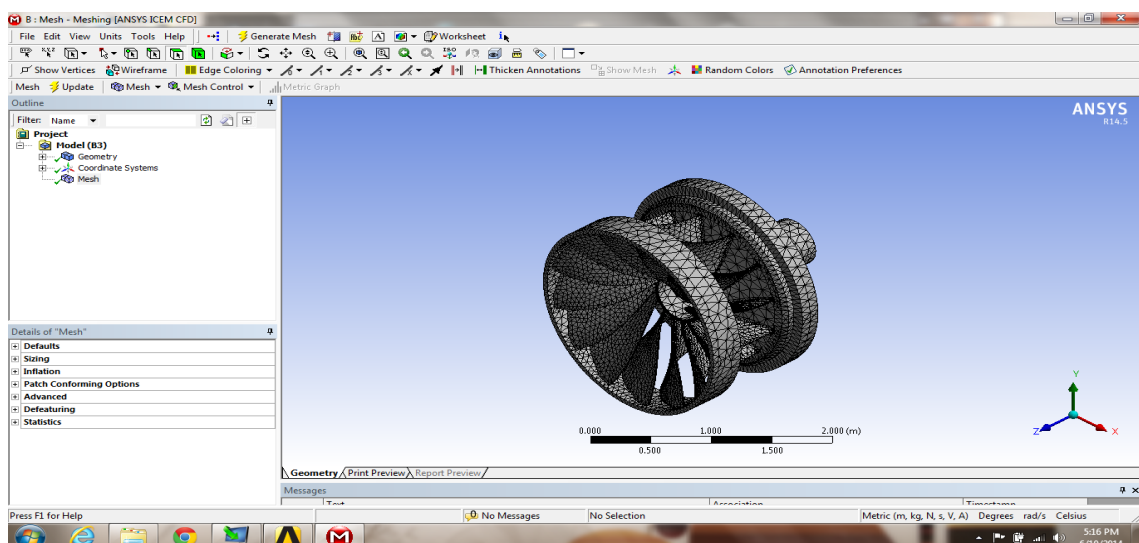


Figura 23 - Aplicação das malhas no sólido.

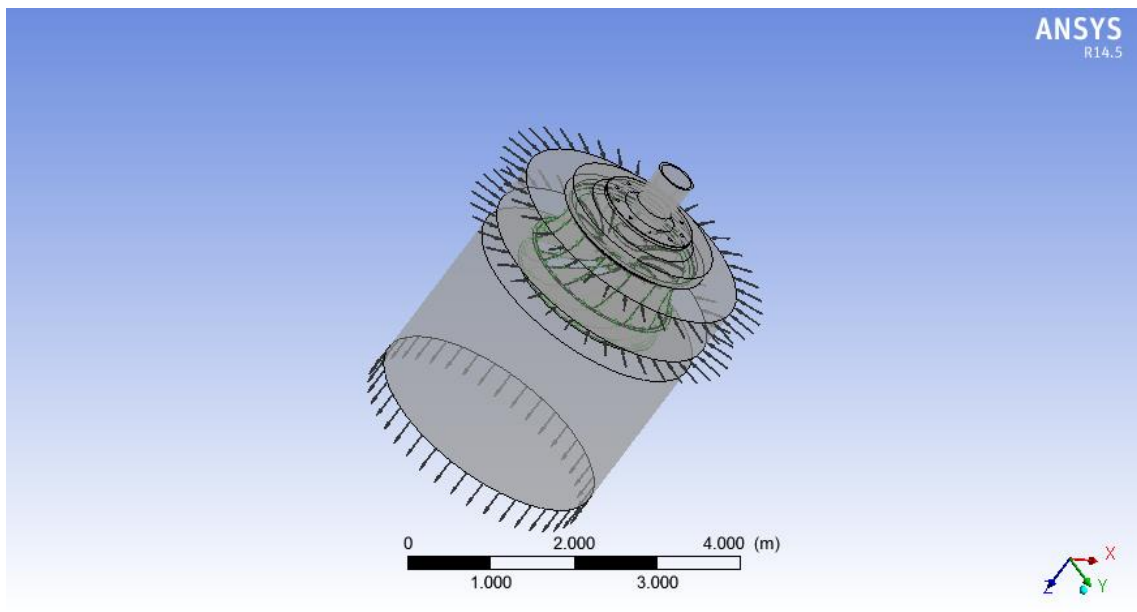


Figura 24 - Determinação da entrada e saída do escoamento (*Inlet* e *Outlet*).

Com a malha bem trabalhada é necessário enviar ao software os parâmetros de projeto que deverão ser estudados dentro da ferramenta *CFX setup*. Com os parâmetros bem definidos é então necessário selecionar o número de interações que devem ser realizadas. O número de interações necessárias varia de acordo com o projeto e a precisão dos resultados pode ser verificada no gráfico gerado pelo sistema mostrado na Figura (24). Conforme as linhas do gráfico passam a representar um valor menor o resultado a ser obtido se torna mais preciso.

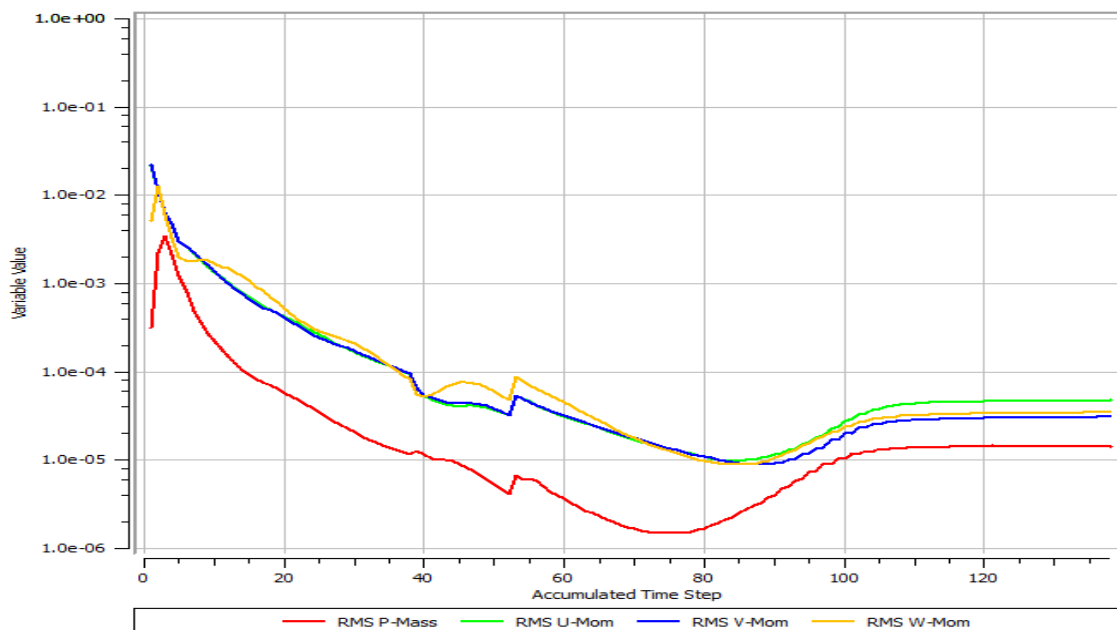


Figura 25 - Gráfico de iterações.

Com o processo de simulação terminado é possível verificar os resultados obtidos utilizando a ferramenta *CFX Results*, onde é possível de fato analisar o sistema simulado e então traçar os gráficos do comportamento do fluido.

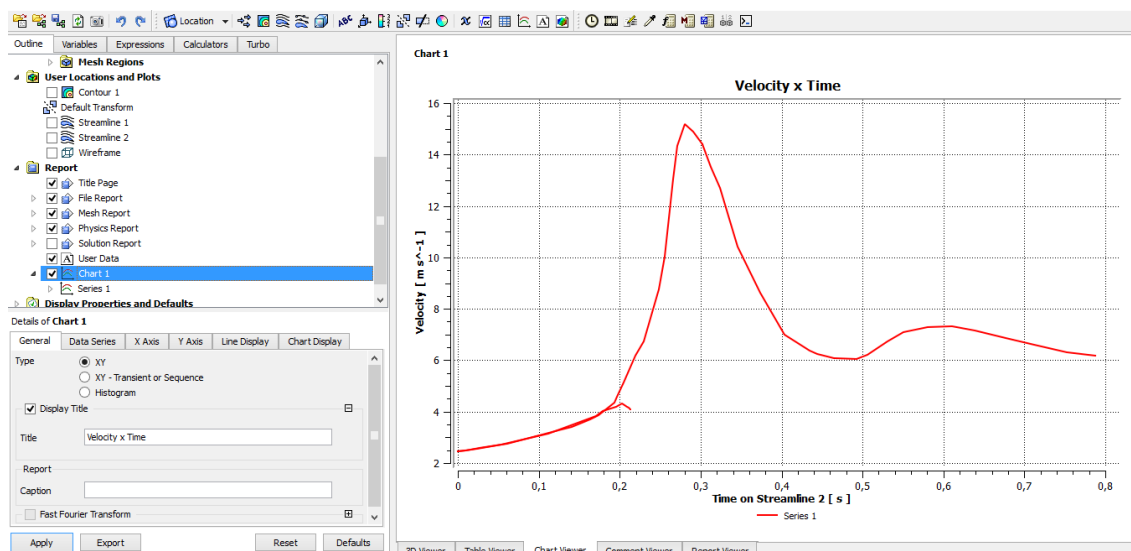


Figura 26 - Pagina de resultados do *Ansys CFX* (exemplo).

### 3.4. ENSAIOS COM O MODELO REDUZIDO

Visando reduzir o risco de execuções errôneas em projetos de centrais hidrelétricas de grande porte a fabricação de modelos reduzidos para ensaios e testes é uma ferramenta imprescindível no projeto. Os modelos, tanto aumentados como reduzidos, devem geométrica, cinemática e dinamicamente semelhantes à máquina projetada (Henn, 2012).

Com a simulação computacional do protótipo e a fabricação do modelo reduzido, foram realizados ensaios submetendo o modelo reduzido fabricado a diferentes vazões esperando obter rotações significativas no eixo para então serem medidos e verificados.

Com o ensaio adequado é necessário a verificação de semelhança de alguns grupos adimensionais, presentes na Tabela (8).

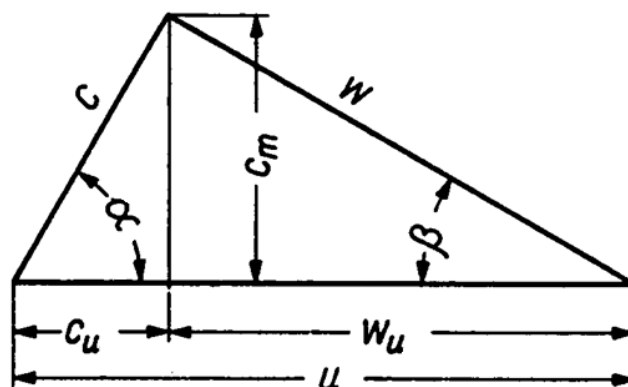


Figura 27 - Triângulo de velocidades. Fonte: PUCRS 2013.

Tabela 8 – Possíveis grupos adimensionais a serem verificados. Fonte Mario H. Hirata.

Nome	Equação	Significado físico
Coeficiente de força	$C_F = \frac{F}{\frac{1}{2} \rho U^2 A}$	Representa uma força adimensional
Coeficiente de arrasto	$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho U^2 A}$	Representa a força de arrasto adimensional
Coeficiente de pressão	$C_p = \frac{(p - p_o)}{\frac{1}{2} \rho U^2}$	Representa a diferença de pressão adimensional
Número de cavitação	$C_v = \frac{(p - p_v)}{\frac{1}{2} \rho U^2}$	Se $C_v < 0$ há risco de ocorrer cavitação
Número de Euler	$E = \frac{p}{\frac{1}{2} \rho U^2}$	Descreve as perdas em um determinado escoamento.
Número de Froude	$Fr = \frac{U}{\sqrt{gD}}$	Importância relativa da força inercial quando comparada com a força gravitacional
Número de Reynolds	$Re = \frac{\rho U D}{\mu}$	Importância da força inercial quando comparada com a força viscosa
Número de Weber	$W = \frac{\rho U^2 D}{\sigma}$	Importância relativa da tensão superficial

Para um modelo ser geometricamente semelhante a um protótipo, as relações de proporcionalidade existente entre as dimensões e os ângulos devem se manter idênticas.

$$\frac{D_{protótipo}}{D_{modelo}} = K_G \quad (1)$$

A semelhança cinemática representa a proporcionalidade entre as velocidades e acelerações, para pontos correspondentes, entre o protótipo e o modelo, sendo estes vetores paralelos que possuem relação constante entre seus módulos.

$$\frac{Cm_{protótipo}}{Cm_{modelo}} = \frac{C_{protótipo}}{C_{modelo}} = \frac{U_{protótipo}}{U_{modelo}} = K_C \quad (2)$$

Sendo que os valores de  $Cm$ ,  $C$  e  $U$  são obtidos através da análise do triângulo de velocidades como pode ser visto na figura (19).

Na semelhança dinâmica tipos idênticos de forças devem ser vetores paralelos e a razão entre seus módulos seja determinada por um valor constante, para pontos correspondentes. Além de que um dos grupos adimensionais representados pelo número de Reynolds, o número de Froude, o número de Weber e o número de Euler sejam idênticos para o modelo e para o protótipo.

$$\frac{Fi_{protótipo}}{Fi_{modelo}} = \frac{Fat_{protótipo}}{Fat_{modelo}} = K_D \quad (3)$$

Sendo então os grupos adimensionais  $K_G$ ,  $K_C$  e  $K_D$  alguns dos responsáveis por validar a semelhança entre o protótipo estudado do modelo reduzido.

Através da experiência adquirida com ensaios de turbinas do tipo Francis e de experimentos empíricos foi possível determinar uma relação entre o rendimento do modelo e o rendimento do protótipo. Que é dada pela fórmula de Moody, segundo a NB-580 (ABNT, 1978), para turbinas do tipo Francis levando em consideração o efeito de escala descrita pela Equação (4) (Henn, 2012).

$$\frac{1-\eta_{t\ protótipo}}{1-\eta_{t\ modelo}} = \left( \frac{D_{protótipo}}{D_{modelo}} \right)^{1/5} \quad (4)$$

Para as medições da potencia elétrica na saída do gerador serão acoplados dois multímetros um em paralelo para medir a diferença de potencial e um em série para a medição da corrente que passa pelo circuito, obedecendo a equação (5).

$$\text{Potência elétrica} = \text{Diferença de potencial} \times \text{Corrente elétrica} \quad (5)$$

Para medir a energia transferida pela água será utilizada a equação (6) que descreve a potencia hidráulica disponível em uma barragem.

$$W = \dot{v} \rho g h \quad (6)$$

De forma que assim será possível calcular a eficiência do gerador em relação a energia hidráulica disponível.

Para a medição da vazão será utilizada uma técnica rudimentar, porem eficiente, baseada na medição da massa de agua através de uma balança ao decorrer do tempo.

### 3.5.DESCRICÃO DOS EQUIPAMENTOS

Durante o processo de fabricação da microturbina Francis foi necessário adquirir:

- Um tarugo de nylon de um metro;
- Dois rolamentos NIS™;
- Canos PVC de 100mm e 15mm;
- Filamento plástico ABS.

Tabela 9 - Custos referidos ao processo de fabricação do modelo.

Item	Quantidade	Preço em reais
Tarugo de nylon	1x	40
Rolamentos NIS™	2x	300
Cano PVC de 100m	1x	-
Mangueira	1x	-
Filamento plástico ABS	1x	120
	Total	460



Para a construção do modelo reduzido foi gasto um total aproximado de 460 reais, desconsiderando o custo de utilização da impressora 3D, do torneamento mecânico, tinta e materiais para o acabamento.

Os principais equipamentos necessários para o ensaio da turbina em bancada são:

- Dois Multímetros True RMS, marca: Minipa e modelo ET 2615A;
- Sistema gerador (Dinamo) 3W/6V;
- Cronometro digital;
- Tacômetro digital HOMIS.



Figura 28 - Principais equipamentos para o ensaio. (multímetro, dínamo e tacômetro)

### 3.6. MONTAGEM DA TURBINA

Com a finalização do processo de impressão do rotor da microturbina Francis foi necessário validar suas dimensões para que assim fosse possível usinar o eixo e acoplar os rolamentos para a caixa espiral. As medições foram verificadas com a utilização de um paquímetro.



Figura 29 - Rotor impresso.

O eixo de nylon da microturbina foi usinado utilizando o torno mecânico e a fresa. Como pode ser verificado na Figura (30).

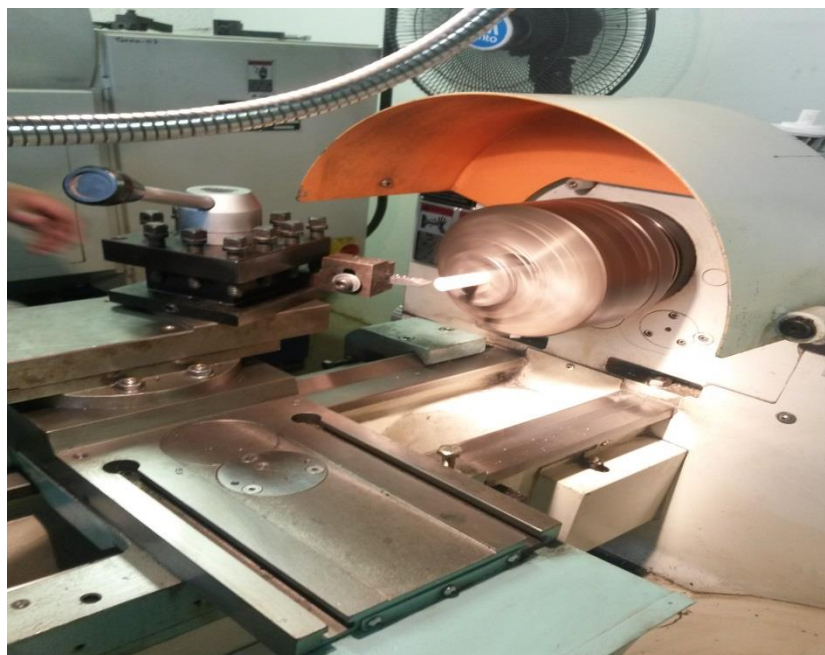


Figura 30 - Torneamento do eixo.

Com a fabricação do eixo foi possível acoplar ao rotor da microturbina os dois rolamentos, como pode ser visto na Figura (31).

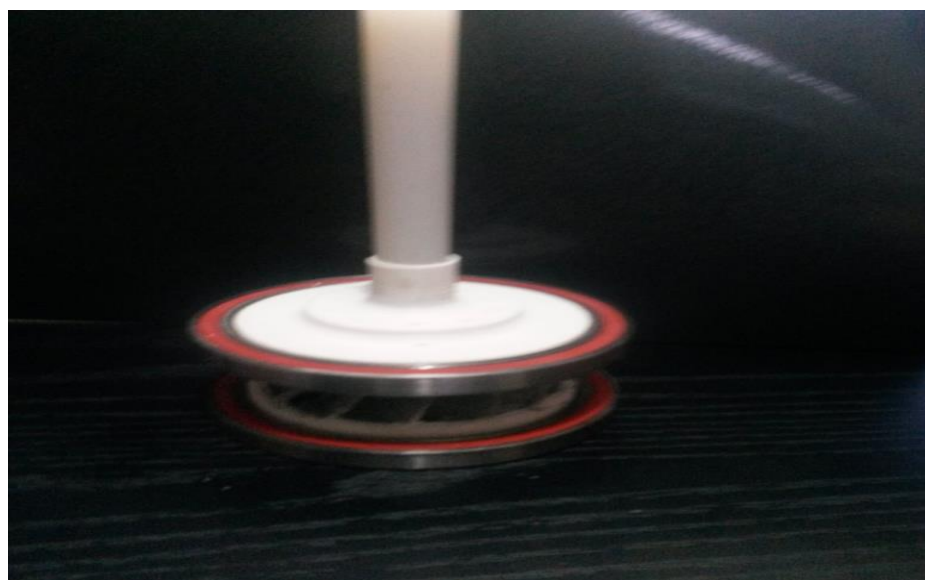


Figura 31 - Acoplamento do rotor e dos rolamentos.

Não foi efetuado o projeto de uma caixa espiral conforme a literatura. Portanto a caixa espiral foi aproximada a forma de um cilindro, sendo a admissão do fluido feita por meio da mangueira que funciona como o injetor. O resultado final da montagem da microturbina Francis é mostrado na Figura (32).



Figura 32 - Resultado final da montagem.

### 3.7. INCERTEZAS EXPERIMENTAIS

Os termos erro e incerteza não são equivalentes. Toda medida experimental apresenta um erro que necessita ser estimado e compreendido, enquanto que a incerteza é a melhor estimativa do erro. Para a fabricação do modelo reduzido da turbina Francis é necessário minimizar os erros para obter dados os mais próximos possíveis do valor real (Ferraz 2009).

Tendo em vista que para a fabricação do modelo final da turbina Francis em plástico ABS é necessária uma serie de medidas e simulações que podem acarretar em acúmulos de erros.

É importante frisar que foram analisadas a exatidão dos equipamentos utilizados no processo de fabricação bem como a tolerância na simulação computacional, levando em consideração que as os ensaios experimentais foram inconclusivos.

Para o bom andamento do projeto foram realizados ensaios repetitivos, visando indicar um grau de concordância entre diferentes resultados de medições sucessivas de um mesmo mensurado; através das extensivas interações realizadas pelo software *Ansys CFX* que trabalhou com uma tolerância de 0.01 em suas diversas unidades de medida.

Com a repetição de medições é possível perceber alguns erros aleatórios podendo minimizar seus efeitos. Os equipamentos utilizados para análises experimentais devem estar bem calibrados para evitar erros sistemáticos.

A impressora 3D RepRap apresenta uma exatidão de 0.1mm em relação a posição especificada e de 0.3mm para espessura da camada(Manual RepRap, 2013).

#### 4. RESULTADOS

Tendo a turbina Pelton PowerWheel como principal referência, foram iniciados os processos iniciais de planejamento para a fabricação de um modelo semelhante, porem de uma turbina do tipo Francis.



Figura 33 - Modelo para estudos desenvolvido pela empresa PowerWheel.

Para a elaboração do projeto foi realizado o levantamento das principais geometrias de turbinas do tipo Francis utilizadas no mercado. Assim como as suas aplicações específicas, para assim determinar a geometria a ser utilizada, com base na importância do desenvolvimento de tecnologias sustentáveis para a geração de energia para sistemas isolados. O modelo selecionado foi o de uma microturbina Francis Normal e seu desenho foi inspirado no modelo proposto por Tryfon Routoulas.

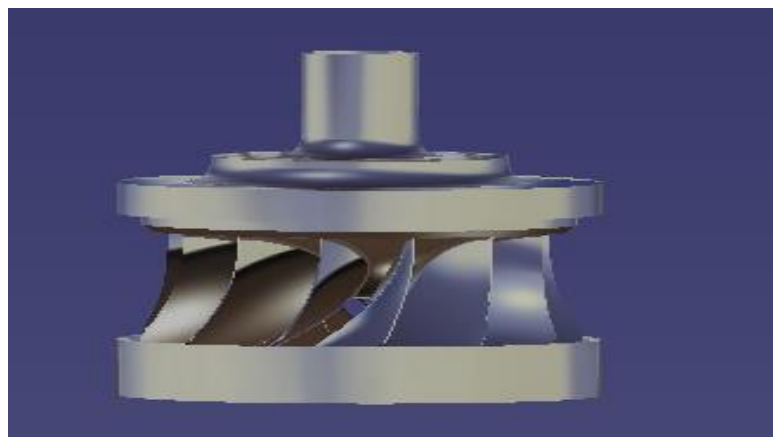


Figura 34 - Modelos 3D pronto para a exportação.



#### 4.1. IMPRESSÃO 3D DO MODELO REDUZIDO

A impressora selecionada para a fabricação do modelo reduzido foi a *RepRap*, pela facilidade de impressão, equipe técnica e disponibilidade.

Foi determinado o material de fabricação da turbina, de modo que a turbina tenha as melhores propriedades físicas possíveis, o material selecionado para a fabricação do rotor foi o plástico ABS e para o eixo foi selecionado o nylon.

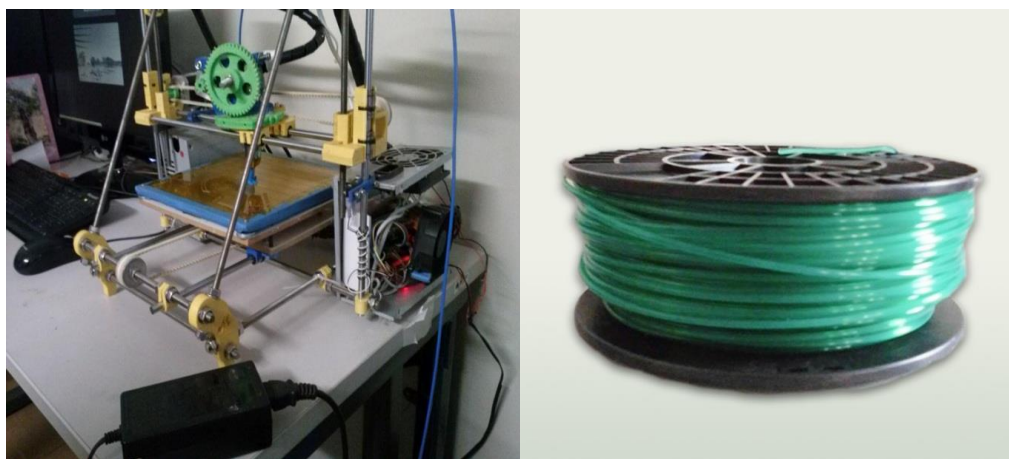


Figura 35 - Impressora 3D RepRap e um rolo de plástico ABS antes da fabricação do modelo. Fonte: China Suppliers 2013.

Durante a fabricação da turbina Francis na impressora 3D RepRap foi observado que ela se trata de um equipamento inviável de fabricação de um modelo de turbina nas dimensões requeridas, isso devido a espessura das pás que foram fabricadas sempre no limite mínimo de precisão da impressora. A Figura (36) mostra o processo de fabricação na impressora 3D RepRap, onde é possível perceber as imperfeições ocorridas durante o processo.



Figura 36 - Fabricação do rotor na impressora 3D RepRap.

Durante o processo de impressão das pás foi percebido que a quantidade requerida de suportes a serem inseridos na estrutura é enorme, acarretando assim na necessidade da turbina fabricada ser retrabalhada manualmente, o que impediria a agilidade na fabricação dessa turbina em escala industrial.

Um dos maiores problemas gerados foi relacionado ao bico injetor da impressora que ao imprimir uma camada superior devido a sua imprecisão deslocava o material da camada inferior, que ainda não estava solidificado, dificultando assim a fabricação das partes mais sensíveis da turbina, como por exemplo as pás do rotor.

Foi percebido que a variação de temperatura do bico injetor da impressora 3D queimava as extremidades das pás do rotor, danificando suas conexões com seus apoios, como pode ser visto na Figura (37).



Figura 37 - Exemplo da base do rotor danificada pelo excesso de temperatura.

Sendo assim os principais problemas ocorridos ao longo do processo de fabricação na impressora 3D *RepRap* foram:

- Elevada quantidade de suportes;
- Imprecisão do bico injetor;
- Temperatura de trabalho do bico injetor.

Após uma sequência de tentativas foi possível fabricar um modelo reduzido de um rotor de turbina Francis com a melhor configuração possível dentro das limitações da impressora *RepRap*, que pode ser visto na Figura (38).

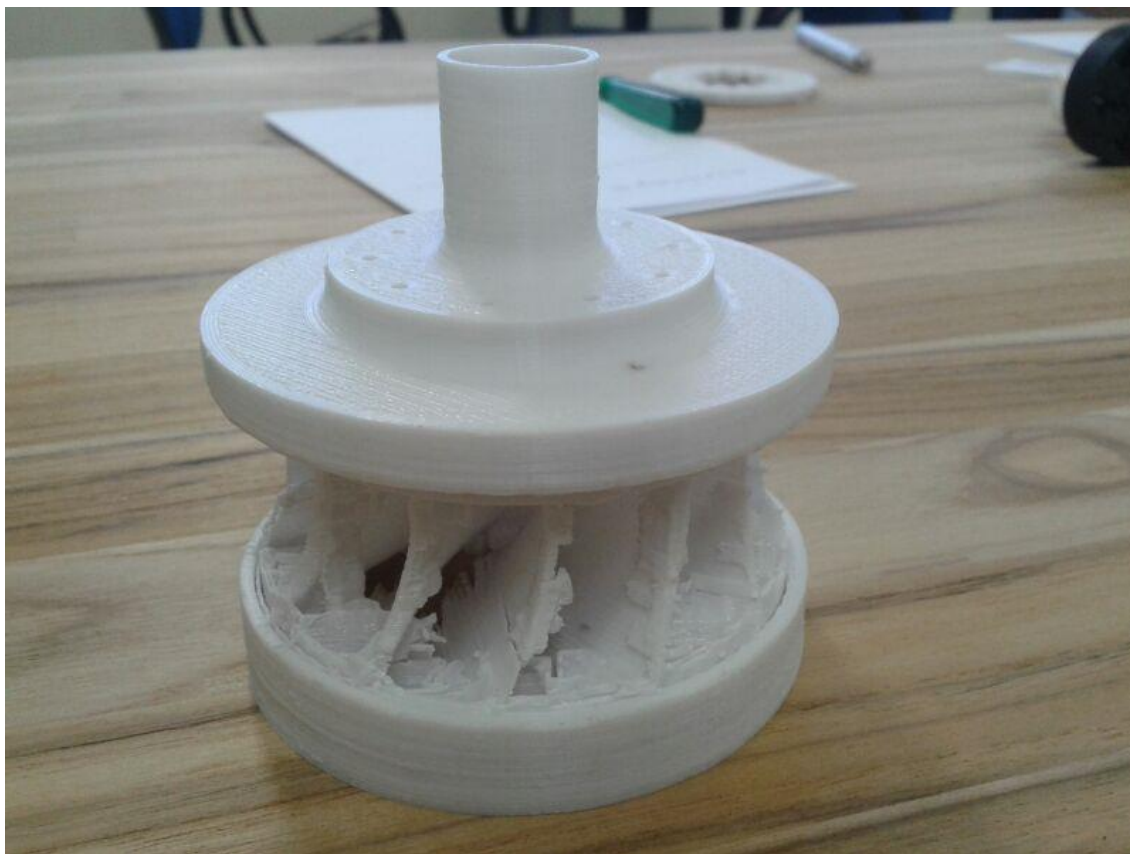


Figura 38 - Modelo reduzido fabricado na impressora 3D RepRap.

Mesmo se tratando do melhor modelo impresso na impressora 3D RepRap foi possível perceber os efeitos negativos da temperatura elevada, que danificou determinadas áreas do rotor, além de rachaduras e rupturas que inviabilizaram parte dos ensaios.

#### 4.2. SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DO PROTÓTIPO.

Foi simulado o comportamento de um rotor Francis de 13 pás com uma rotação de 514 RPM onde o parâmetro variado foi a vazão. Foram simuladas vazões de 15, 10 e 5 m<sup>3</sup>/s.

Foi gerada e trabalhada uma malha tetraédrica com as características descritas na Tabela (10), o que definiu os resultados obtidos. Onde foram considerados 101145 nós e 404612 elementos.



Tabela 10 - Especificações da malha.

Domínio	Nós	Elementos
Default Domain	34406	130944
Default Domain Modified	66739	273668
All Domains	101145	404612

A Figura (39) mostra o movimento da água no rotor Francis. As linhas de corrente são indicadores da trajetória do escoamento dentro do rotor Francis. Os vetores de velocidade e as linhas de corrente indicam que o escoamento sofre uma aceleração à medida que ele é admitido, sofrendo um retardo no momento em que o escoamento sai do rotor. As linhas de corrente podem ser melhores visualizadas na Figura (40), que mostra as linhas de corrente isoladas.

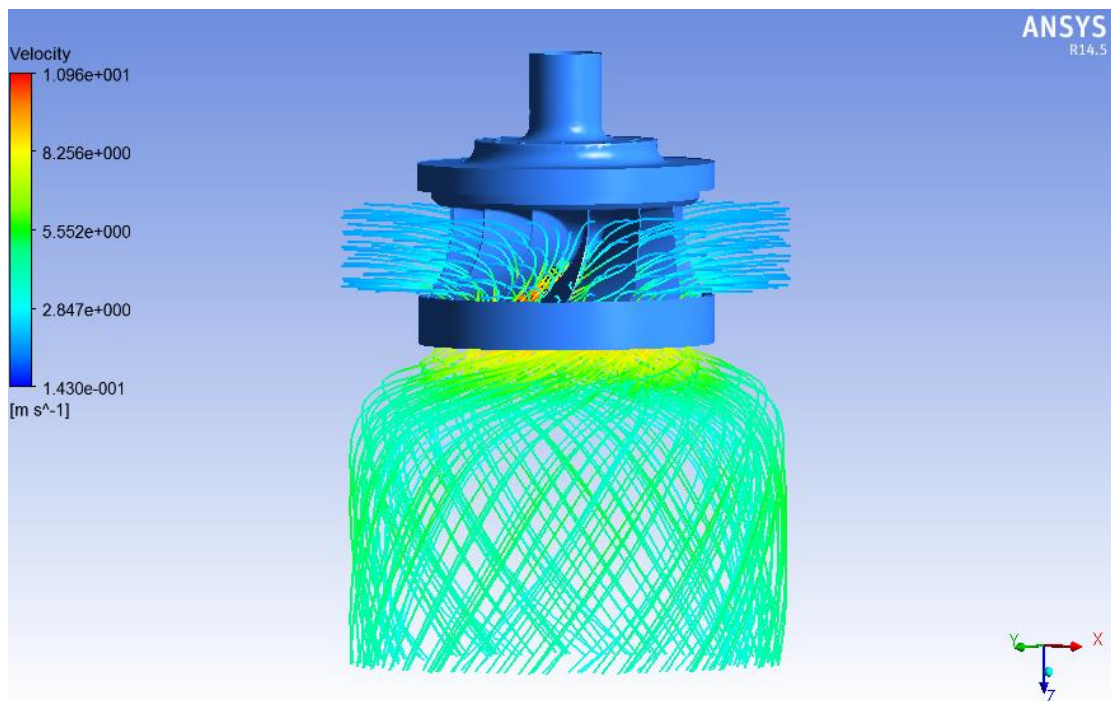


Figura 39 - Linhas de corrente no rotor Francis.

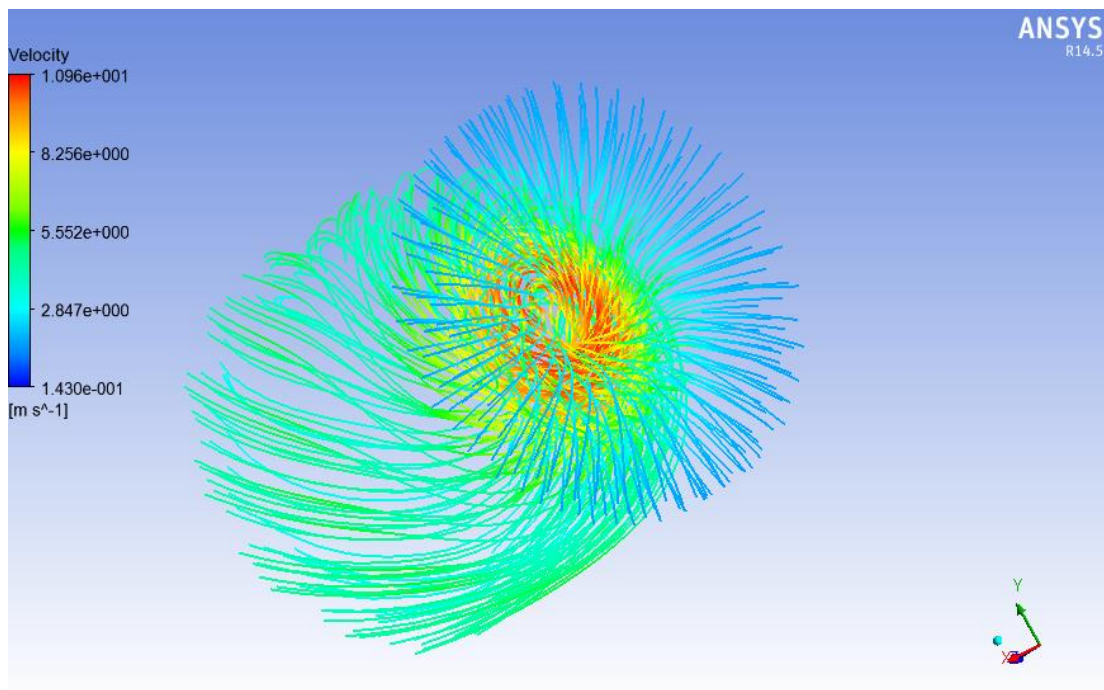


Figura 40 - Linhas de corrente isoladas.

Uma importante consideração é que não foram simulados os efeitos gerados pelo tubo de sucção na saída do rotor Francis, e que nas Figuras (39) e (40). O fluido está sendo admitido perpendicularmente as pás do rotor, simulando o efeito obtido por um conjunto de palhetas que encaminham o fluido para as pás do rotor.

A Figura (41) mostra o escoamento sem a simulação das palhetas, levando em consideração apenas a simulação do efeito de rotação circular causado pela caixa espiral.

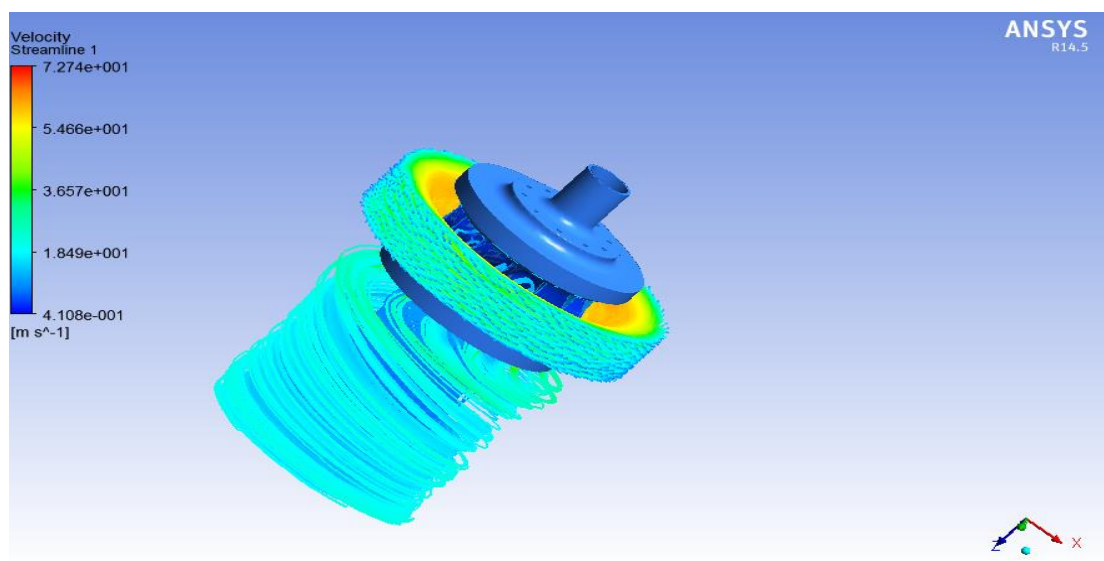


Figura 41 - Linhas de corrente simulando os efeitos de uma caixa espiral.

As análises semelhantes à Figura (41), que simulam apenas os efeitos de uma caixa espiral na admissão do fluido nas pás do rotor, foram inconsistentes. Foi percebido que nestas configurações parte do fluido que circulava entorno do rotor sofria uma desaceleração com o passar do tempo, não sendo admitido de fato pelo rotor, causando uma série de inconsistências nos resultados obtidos devido às condições de contorno adotadas.

Os Gráficos (1), (2) e (3) mostram o aumento de velocidade do escoamento ao longo do tempo, para cada vazão simulada. Nota-se que a velocidade do escoamento aumenta proporcionalmente com o aumento da vazão, sendo o aumento de velocidade maior para vazões maiores. É importante lembrar que para a geração dos gráficos foram isoladas duas linhas de corrente que representassem o comportamento do fluido ao longo do tempo.

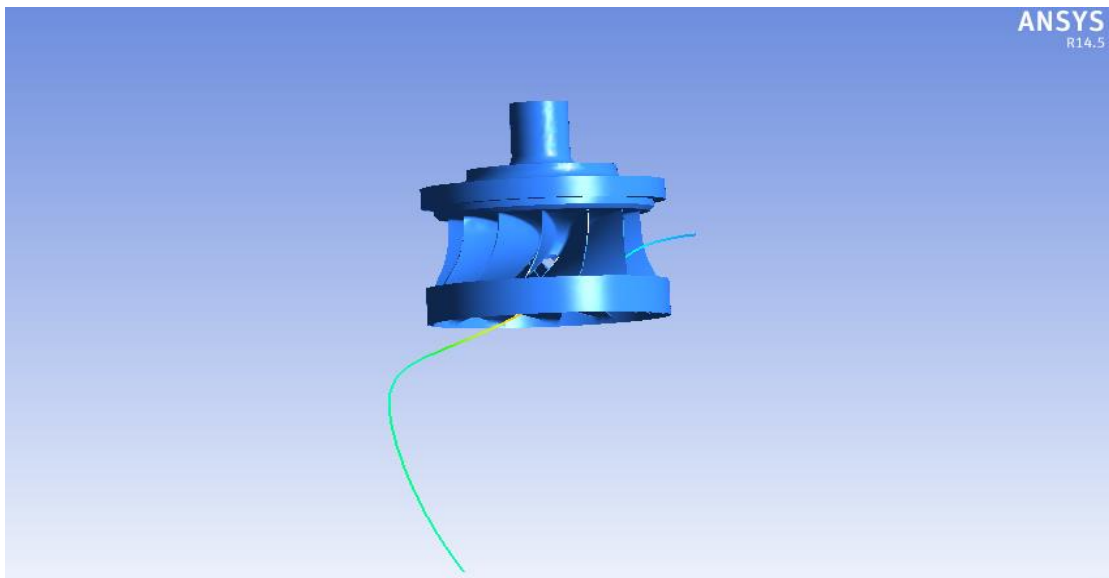


Figura 42 Linha de corrente isolada.

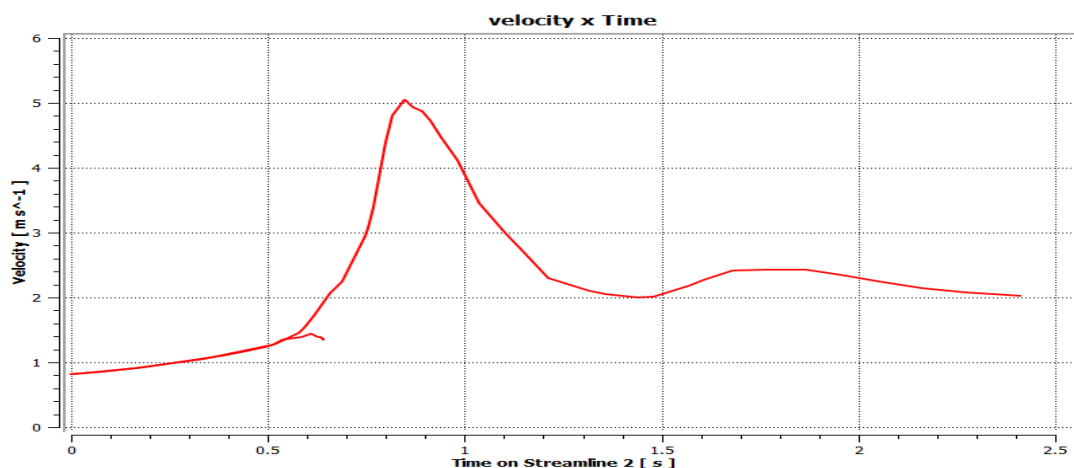


Gráfico 1 - Vazão de 5m³/s.

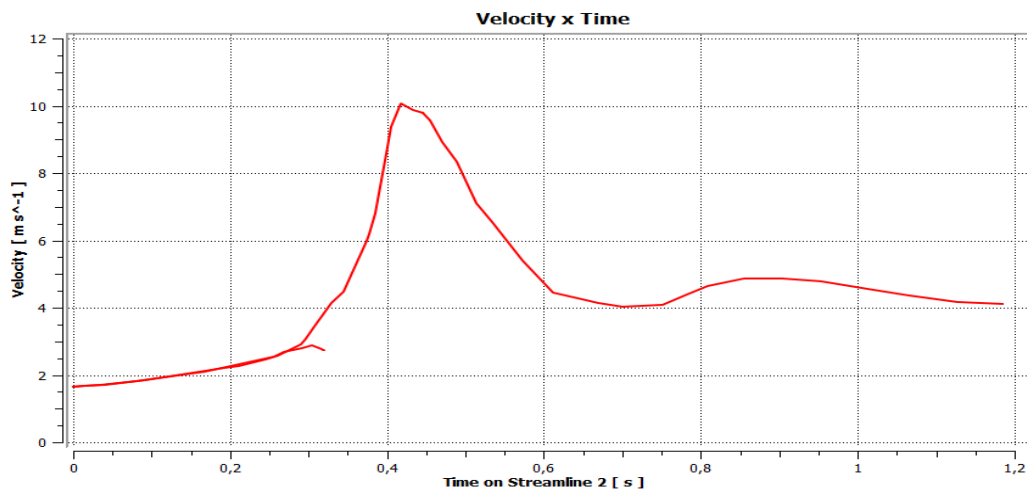


Gráfico 2 - Vazão de 10m³/s.

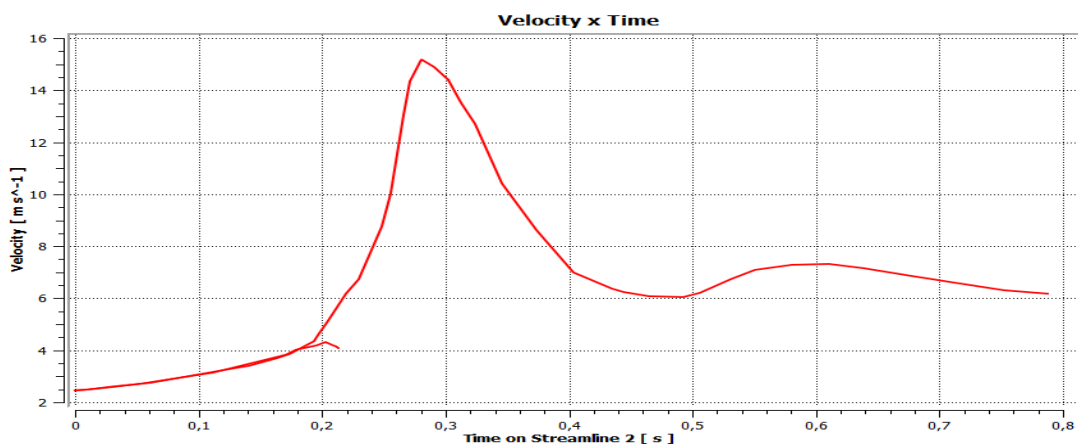


Gráfico 3 - Vazão de 15m³/s.

Um modelo de dimensões semelhantes opera na central hidrelétrica do Paranoá com uma queda de 104,5 metros, a uma rotação de 514 RPM possuindo uma potência instalada de 12,675 CV. De onde foi retirado grande parte dos parâmetros utilizados para a simulação numérica do protótipo.

Com base nos gráficos e sua análise foi possível determinar a energia gerada entre o pico da função, momento de maior velocidade e a saída do escoamento aproximada pela equação da energia, Equação (7).

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 + \Delta H \quad (7)$$

Para que assim fosse possível determinar a potência aproximada gerada nesse intervalo por meio da equação (8).

$$Potência = \rho g Q \Delta H \quad (8)$$

Tabela 11- Relação entre vazão e potência.

Vazão (m <sup>3</sup> /s)	Potência
5	52,5 KW
10	420 KW
15	1,5 MW

Lembrando que para os cálculos foi considerado que a pressão relativa entre a entrada e a saída do escoamento é nula e a diferença de altura desprezível.

Uma importante análise computacional é a distribuição de pressão ao longo das pás do rotor levando em consideração os objetivos do projeto de fabricação e operação da turbina.

O software *Ansys CFX* não possui em sua biblioteca de materiais o plástico ABS, portanto foi selecionado o material com as propriedades físicas e químicas mais similares, o poliestireno. A Figura (43) mostra a distribuição de pressão ao longo das pás do rotor, é percebido que no ponto onde o fluido é admitido pelo rotor é o que aparenta ser o ponto de maior esforço.

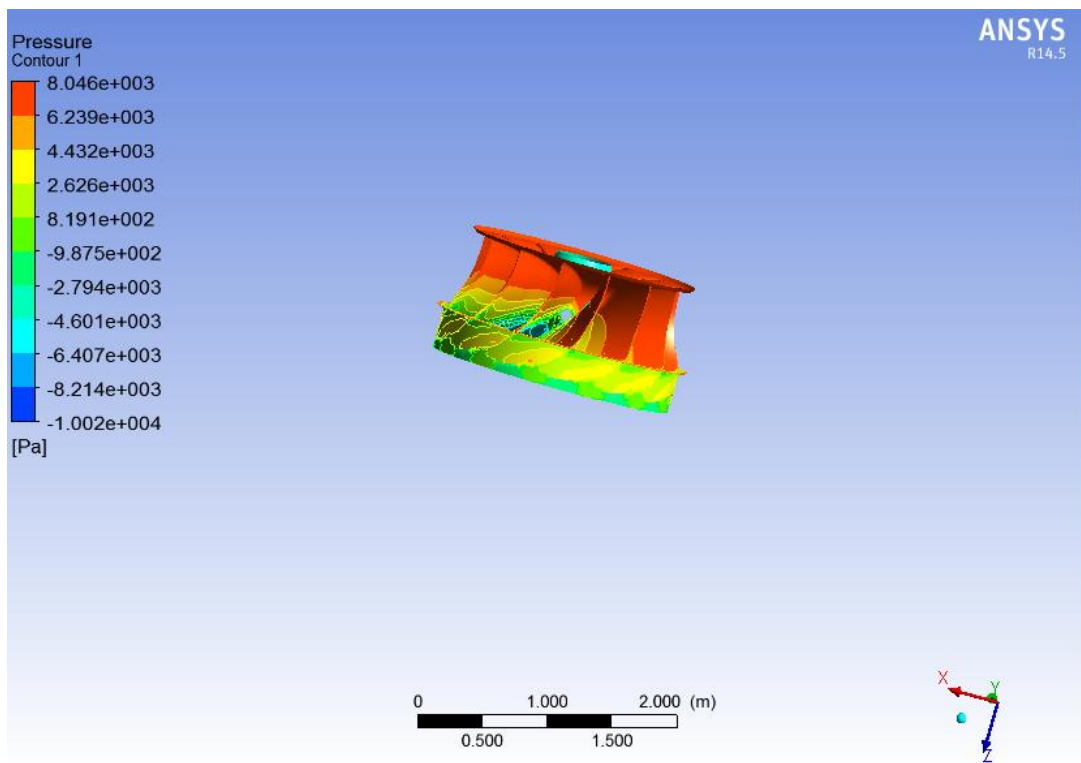


Figura 43 - Distribuição de pressão nas pás do rotor na entrada do escoamento.

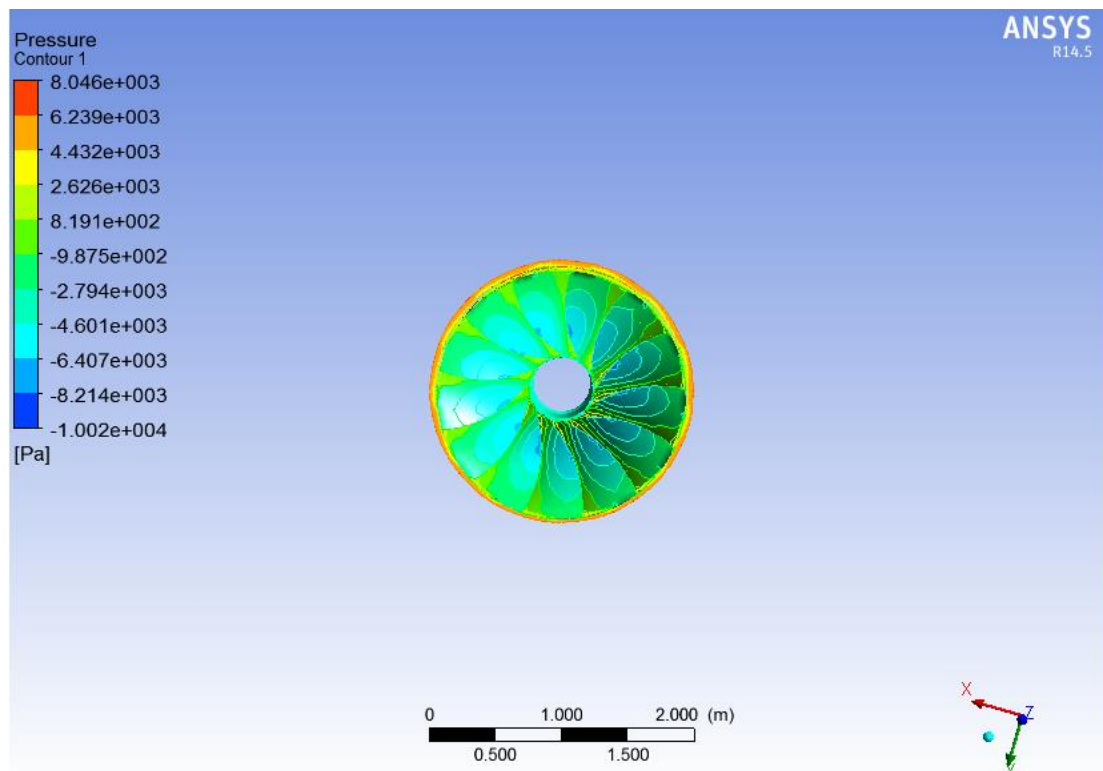


Figura 44 - Distribuição de pressão nas pás do rotor na saída do escoamento.

Quando alterado o material de simulação da turbina para materiais de alta resistência mecânica, como o aço, são imperceptíveis os esforços causados pelo escoamento nas mesmas condições de trabalho.

#### 4.3. ENSAIO DO MODELO REDUZIDO

Não foram obtidos resultados satisfatórios nos ensaios com o modelo reduzido. Os maiores problemas verificados durante os ensaios foram:

- Ausência de uma caixa espiral, que direcionasse o fluido bem como válvulas de regulação da vazão. Foi utilizada uma aproximação cilíndrica da caixa espiral para os ensaios.
- Ausência de palhetas móveis para direcionar o fluido para as pás com uma angulação adequada.
- Seleção inadequada dos rolamentos, que exigiam um torque elevado para a operação e não possuíam boa resistência à água.
- Fragilidade do modelo reduzido do rotor, causado pelo processo de fabricação selecionado.



Para o correto funcionamento da turbina seria necessária uma vazão muito elevada, considerando a fragilidade do rotor os ensaios foram finalizados de forma a preservar a estrutura do rotor da turbina. Para seu adequado funcionamento seria necessário o planejamento e construção de uma caixa espiral, palhetas moveis, e rolamentos próprios para operações com água.

Ao longo dos ensaios foram verificados diversos danos às pás do rotor, causando rachaduras e rupturas em sua estrutura, tais rupturas e rachaduras foram reparadas utilizando massa plástica. A cada reparo foi verificado um aumento da espessura das pás e sua rugosidade, o que reafirma a conjectura de que é necessária a impressão de um novo modelo de rotor em uma impressora 3D de maior precisão, gerando uma turbina de melhor qualidade, mais resistente aos esforços mecânicos.

A Figura (45) mostra diversos pontos que foram reparados, e é possível também verificar rupturas e rachaduras ao longo da estrutura das pás do rotor.

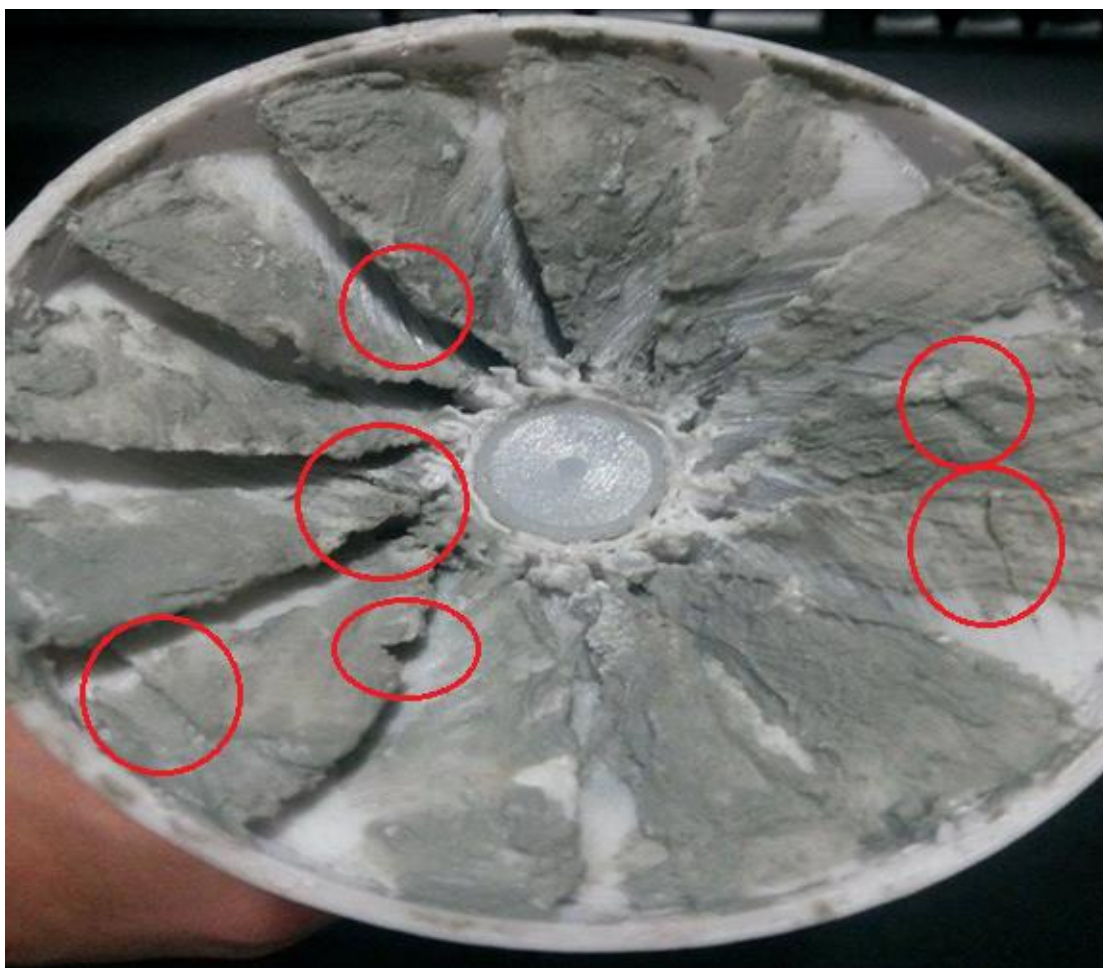


Figura 45 - Rotor danificado pelos ensaios.

O coeficiente de vazão se trata de um número adimensional para as características da turbina (Uma adimensionalização da vazão). Podemos verificar a vazão necessária para a correta operação do modelo reduzido por meio da Equação (9).

$$C_q = \frac{Q}{nD^3} \quad (9)$$

Por se tratar de um valor adimensional foi igualado o  $C_q$  do modelo reduzido ao do protótipo estudado como pode ser visto na Equação (10).

$$\left[ \frac{Q}{nD^3} \right]_{\text{modelo}} = \left[ \frac{Q}{nD^3} \right]_{\text{protótipo}} \quad (10)$$

A vazão necessária para trabalharmos com o modelo simulando as mesmas condições do protótipo calculada foi de 16 litros por segundo, uma vazão extremamente alta para a operação da turbina fabricada.

O resultado final da modelo reduzido pode ser verificado por meio da Figura (46).

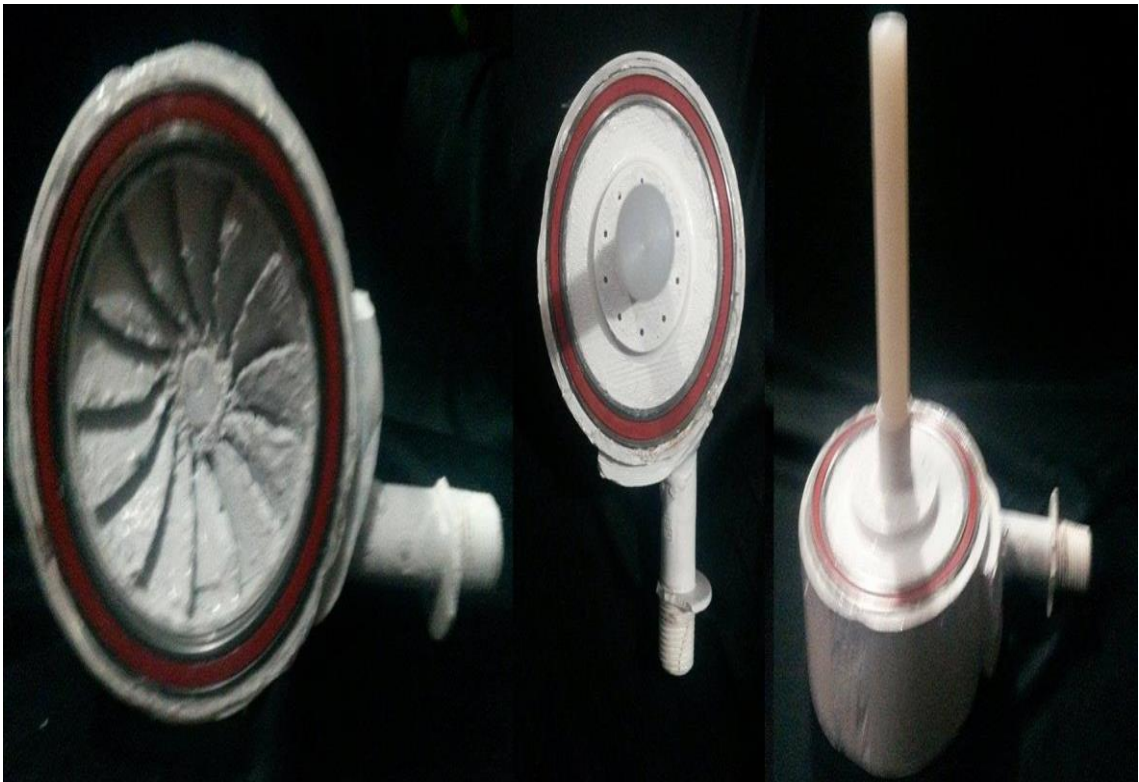


Figura 46 - Modelo reduzido de microturbina Francis.



## 5. ORGANIZAÇÃO DO PROJETO

### 5.1. CRONOGRAMA

A organização do tempo estipulado para cada uma das etapas foi realizada a partir de um cronograma de atividades, onde é apresentado cada uma das diferentes fases do processo de produção da microturbina Francis em modelo reduzido, sendo plausível de alteração mediante o aparecimento de imprevistos.

- ✓ Primeira etapa – Planejamento do projeto, revisando a bibliografia para estabelecer os parâmetros a serem utilizados.
- ✓ Segunda etapa – Definição do método de operação, definindo os softwares de modelagem da geometria 3D e de simulação numérica computacional.
- ✓ Terceira etapa – Definição do equipamento de fabricação do modelo reduzido.
- ✓ Quarta etapa – Ajuste das metodologias para por em execução o processo de fabricação da microturbina Francis.
- ✓ Quinta etapa – Finalização do modelo 3D através do software CatiaV5R19.
- ✓ Sexta etapa – Fabricar o modelo reduzido na impressora 3D.
- ✓ Sétima etapa – Simulação computacional do modelo 3D.
- ✓ Oitava etapa – Ensaios de modelo reduzido da geometria fabricada.
- ✓ Nona etapa – Análise dos resultados.

Tabela 12 – Cronograma TCC 1.

	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro
Primeira etapa				
Segunda etapa				
Terceira etapa				
Quarta etapa				

Tabela 13 – Cronograma TCC 2.

	Maço	Abril	Maio	Junho
Quinta etapa				
Sexta etapa				
Sétima etapa				
Oitava etapa				

## 6. CONCLUSÃO

Tendo em vista a dificuldade de incorporar algumas regiões isoladas ao sistema interligado de energia elétrica a criação de pequenas centrais geradoras de energia é uma solução plausível para minimizar os efeitos do isolamento. Tendo como motivação levar energia até estas zonas o trabalho propôs a criação de um modelo de uma pequena central hidrelétrica contendo uma microturbina Francis, fabricada em material de baixo custo e alta acessibilidade.

Por meio do estudo de seleção de turbinas é possível afirmar que a turbina que melhor atende a demanda da região devido às diferenças geográficas é a turbina do tipo Francis.

Estudando as principais geometrias de turbinas Francis foi definido que a turbina cujas características que melhor atendem a demanda desse projeto é a Francis normal, por ser um modelo de tamanho acessível e com ampla aplicabilidade devido a grande faixa de operação, como pode ser visto na Figura (12).

A fabricação do rotor do modelo foi feita por meio de impressão 3D, associada à usinagem em torno mecânico do eixo. A caixa espiral foi fabricada rudimentarmente utilizando uma associação de canos PVC, uma aproximação cilíndrica de uma caixa espiral. Considerando o baixo custo, equipe técnica competente e disponibilidade do equipamento a impressora do modelo *RepRap* foi selecionada. O material escolhido para a fabricação do rotor e do sistema diretor foi o plástico ABS, pois ele apresenta as melhores propriedades físicas necessárias para esse modelo, enquanto o eixo foi feito de nylon.

A impressora do modelo *RepRap* não obteve um modelo de rotor adequado para o projeto levando em consideração a baixa qualidade das pás do rotor que possuíam uma alta fragilidade.

Durante a simulação computacional foi utilizado um modelo real de turbina Francis, que opera na UHE Paranoá em Brasília devido a maior facilidade de obtenção dos parâmetros de simulação.

Foi percebido ao longo das simulações um comportamento diretamente proporcional entre a vazão utilizada e a velocidade do escoamento, o que vai de acordo com a teoria apresentada. A observação da distribuição de pressão ao longo das pás obtidas pelas simulações foi de acordo com os ensaios realizados tendo em vista que as zonas onde existem as maiores pressões foram justamente onde houveram mais rachaduras e rupturas das pás.

O comportamento das linhas de corrente foi de acordo com o esperado, houve um aumento da velocidade das linhas de corrente conforme adentravam o rotor da turbina e atingiam sua velocidade máxima prestes a saída do escoamento.

Durante as tentativas de simulação foi percebido que a melhor configuração de entrada do fluido é perpendicular as pás do rotor. Utilizando uma entrada rotativa do fluido (simulando apenas a caixa espiral) não foram obtidos resultados conclusivos, pois parte do fluido não era de fato admitida pela turbina.

Através do estudo de semelhança para modelos reduzidos foi possível determinar a vazão necessária para a correta operação da microturbina Francis fabricada, que foi de 16 litros por segundo, uma vazão inviável para a operação, pois a fragilidade do equipamento não suportaria a pressão gerada.

Para a verificação da similaridade entre os modelos de forma mais coerente é necessário um estudo aprofundado do sistema de admissão do fluido na microturbina fabricada bem como um refinamento do processo de fabricação do rotor, utilizando uma impressora 3D com uma precisão superior.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agência Nacional de Energia Elétrica (2012) Atlas de energia elétrica do Brasil 3ª edição.

Auto Desk (2011) [online] 20/11/2013  
[http://exchange.autodesk.com/autocadmechanical/ptb/online-help/AMECH\\_PP/2012/PTB/pages/WS1a9193826455f5ffa23ce210c4a30acaf-59e2.htm](http://exchange.autodesk.com/autocadmechanical/ptb/online-help/AMECH_PP/2012/PTB/pages/WS1a9193826455f5ffa23ce210c4a30acaf-59e2.htm)

Balanço energético nacional (2013)

Bran, R. Souza, Z. (1980) Máquinas de Fluxo: turbinas, bombas e ventiladores. 2 ed. Rio de Janeiro: Ao livro Técnico, 1980.

Caricimi, R. (2010) Modelo de confiabilidade para subsistema de regulação de turbina Francis. Projeto final de graduação.

Centro Nacional de Referencia em Pequenas Centrais Hidrelétricas [online] 20/11/2013. <http://www.cerpch.unifei.edu.br/geradores.html>

Chine Suppliers. Dongguan Wanlixing Rubber Co., Ltd [online] 20/11/2013  
[http://pt.made-in-china.com/co\\_mousemat/product\\_3D-Plastic-Filament-ABS-C-001C-\\_eusouiogg.html](http://pt.made-in-china.com/co_mousemat/product_3D-Plastic-Filament-ABS-C-001C-_eusouiogg.html)

Empresa de Pesquisa Energética.( 2013) Cálculo do valor novo de reposição- VNR de empreendimentos de geração de energia elétrica.

Feng-PUCRS – [online] 20/11/2013  
<http://www.feng.pucrs.br/lsvm/SistFlumec/Exemplos/Poligonos/Exer-Poligonos.htm>

Ferraz, C. A. M. D.(2009) Noções sobre erros e incertezas em medições.

Filho, A. V. (2009) O Brasil no Contexto energético mundial. NAIPPE/USP

Goldember, J. S.T. Coelho. (2004). Renewable Energy – Tradition modern Biomass. Energy Policy 32: pg. 711-714

GrabCad [online] 21/11/2013 <https://grabcad.com>

HENN, É. L. Máquinas de Fluido.(2012) Santa Maria: Editora UFSM.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2010) Censo 2010.

International Energy Agency,(2013) Annual energy outlook 2013 with projections to 2040.

International Energy Agency,(2010). Statistics of Non-OECD Countries.

Jiménez R.K.G. (2004) Predição Teórica das Características Hidrodinâmicas de Turbinas Francis. UFI: Dissertação de mestrado.

Jones, R. Haufe, P. Ed Selss, Iravani, P. Olliver, V. Bowyer, A. (2010) RepRap - The Replicating Rapid Prototyper.

Kimura, N. (2005) Modelagem do comportamento térmico dos anéis de desgaste de uma turbina Francis operando em compensador síncrono. Dissertação de mestrado.

Lima A.K.F (2011) Análise do escoamento em uma unidade hidrogeradora da usina hidrelétrica de Tucuruí. UFP: Projeto final de graduação.

Mendes, R. C. F. (2013) Ensaio em modelo reduzido de rotores de turbinas hidrocínéticas. Unb: Projeto final de graduação.

Ministério de Minas e energia (2008) Pequenos aproveitamentos Hidroelétricos- Soluções Energéticas para a Amazônia.

Miranda R.L (2009) Regulação técnica para se obter melhor eficiência na motorização de pequenas centrais hidrelétricas no Brasil. UNIFACS: Dissertação de mestrado.

Nava, J.M.F., Gómez, O.D., Hernández, J.A.R.L. (2006) Flow Induced Stresses in a Francis Runner using ANSYS.

Noletto, L.G. (2012) INOVATRANS- Inovação de Micro Centrais Hidrelétricas. Capacitação Laboratorial e Transferência de Tecnologia. – Relatório individual de pesquisa.

Operador Nacional do Sistema Elétrico. [online] 20/11/2013 <http://www.ons.org.br>

Paula, C.P.(2004) Geração Distribuída e Cogeração no Setor Elétrico: Avaliação Sistêmica de um Plano de Inserção Incentivada. USP: Tese de doutorado..

Pearce, J.M , Morris Blair, C. Laciak, K. J., Andrews R. & Nosrat A., Zelenika-Zovko I. (2010) 3D Printing of Open Source Appropriate Technologies for Self-Directed Sustainable Development.

Pereira, A.L.C (2010) Eficiência hidrodinâmica e otimização no projecto de aproveitamentos hidroelétricos. Dissertação de mestrado.

Plano decanal de expansão de energia.(2019)

Power Wheel Instruct. Inspire. Guide our future acesso 20/11/2013 <http://rb-mfg.com> [online] 20/11/2013

Ramage, J. (1996) Renewable energy: power for sustainable future.

Raulino, B. R. (2011) Manufatura aditiva: desenvolvimento de máquinas de prototipagem rápida baseada na tecnologia FDM (Modelagem por Fusão e Deposição). Unb: Projeto final de graduação.

Rodrigues, AP.S.P (2007) Parametrização e simulação numérica da turbina hidrocínética – otimização via algoritmos genéticos. Dissertação de mestrado.

Rodrigues, A.P.S.P(2012) Uma metodologia híbrida de otimização aplicada às pás de turbinas hidráulicas axiais. Unb: Tese de doutorado.

Santos, C.G. (2012) Dimensionamento e Simulação Computacional de um Rotor Hidráulico do tipo Francis. FAHOR: Projeto final de graduação.

Shukla, M.K, Prasad, V., Hain, R. Shukla, S.N. (2011) CFD Analysis of 3-D Flow for Francis Turbine.

Slid3r G-code generator for 3D printers. [online] 20/11/2013 <http://slic3r.org/>

Soares Jr., R.L (2013) Projeto conceitual de uma turbina hidráulica a ser utilizada na Usina Hidrelétrica externa de Denry Borden. UFRJ: Projeto final de graduação.

Tecnometal. [online] 20/11/2013  
<http://www.tecnometal.com.br/estruturasdenegocios/EnergiasRenovaveis/EnergiaHidromecanica/default.aspx>

TIANYI [online] 20/11/2013 <http://www.tianyi-motor.com>, TianYi(FuJian) Electrical Industry And Trade Co.,Ltd

Tiny gadgets. [online] 20/11/2013 <http://robinsonia.com/wp/?p=149>

Trevisan, A. S. (2011) Efeitos da Geração Distribuída em Sistemas de Distribuição de Baixa Tensão. UFP: Projeto final de graduação.

Routoulas (2012) [online] 20/04/2013 <http://grabcad.com/library/francis-turbine>